

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Biologie

Studijní obor: Antropologie a genetika člověka



Bc. Pavla Alexia Jarešová

Odhad povrchu a objemu těla za využití multisegmentového modelu pro studium
termoregulace

Estimation of surface area and volume of the body using multisegment model for the study of
thermoregulation

Diplomová práce

Školitel: Mgr. Martin Hora, Ph.D.

Praha, 2020

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 7. 8. 2020

Bc. Pavla Alexia Jarešová

Poděkování:

Děkuji Mgr. Martinu Horovi, Ph.D. za vedení diplomové práce, a také za jeho cenné rady a připomínky. Děkuji Dr. rer. nat. Tobiasi Kordsmeyerovi, Dr. Julii Stern a Prof. Dr. Larsi Penkemu za poskytnuté skeny. Dále děkuji probandům za jejich účast. Děkuji také členům Laboratoře antropologie kostní tkáně a Katedry antropologie a genetiky člověka za pomoc s přípravou diplomové práce a za poskytnuté rady. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za podporu a trpělivost.

Abstrakt:

Povrch a objem lidského těla jsou z hlediska termoregulace člověka podstatnými faktory. Cílem této diplomové práce je vytvořit multisegmentový model lidského těla sloužící k odhadu povrchu, objemu a hmotnosti lidského těla, též k odhadu povrchu a objemu segmentů lidského těla. Námi vytvořený model rozděluje tělo na 13 segmentů, z nichž segment trupu byl modelován třemi způsoby (válec s podstavou elipsy, kvádr a válec) a byly tak vytvořeny tři varianty našeho modelu. Rozměry byly vybrány tak, aby model bylo možné aplikovat na živé jedince i na kosterní materiál. Multisegmentový model pro odhad povrchu, objemu a hmotnosti těla jsme, stejně jako stávající modely, testovali za využití 3D celotělových skenů lidského těla 20 jedinců, u kterých byla provedena antropometrie ve virtuálním prostředí.

Z námi vytvořených variant multisegmentového modelu se jeví jako nejspolehlivější varianta model kvádr, a to v odhadu povrchu i objemu těla, kdy v odhadu povrchu byla průměrná procentuální absolutní odchylka menší než 5 % a u odhadu objemu byla menší než 10 %. Model kvádr má při odhadu povrchu druhou nejmenší průměrnou procentuální absolutní odchylku a při odhadu objemu menší průměrnou procentuální absolutní odchylku než předchozí modely. Při odhadu povrchu měly vytvořené varianty multisegmentového modelu lidského těla koeficient determinace větší než 0,91 a při odhadu objemu větší než 0,89. Námi vytvořený multisegmentový model je vhodný k odhadu povrchu i objemu těla.

Klíčová slova: povrch těla, objem těla, termoregulace

Abstract:

Human body surface area and volume are important factors in human thermoregulation. The aim of this diploma thesis is to create a multisegmented model of the human body that serves for estimation of surface area, volume and mass of the human body and surface area and volume of segments of the human body. Multisegmented model constituted by us divides body to 13 segments from which the trunk segment is modeled three different ways (cylinder with ellipse base, cuboid and cylinder) and therefore creates three variants of our model. Dimensions were chosen for the model to function properly on living people and also on skeletal material. A multisegmented model and other models for estimation of surface area, volume and mass of the human body are tested by using 3D scans of the whole body of 20 individuals. Anthropometry in the virtual environment was used.

From our variants of the multisegmented model, the model cuboid appears to be the most accurate one in the estimation of surface area and volume of the human body, when in the estimation of surface area mean percentage absolute difference was under 5 % and in the estimation of body volume was under 10 %. The model cuboid has the second smallest mean percentage absolute difference in the estimation of surface area of the body and the smallest mean percentage absolute difference in the estimation of body volume when compared to all models. All variants of our model have coefficient of determination in the estimation of the surface area of the human body higher than 0,91 and in the estimation of body volume higher than 0,89. Our multisegmented model is appropriate for the estimation of surface area and volume of the human body.

Key words: body surface area, body volume, thermoregulation

Obsah

1 Úvod.....	1
1.1 Termoregulace v evoluci člověka.....	2
1.1.1 Změna tělesných proporcí.....	3
1.1.2 Evoluce fyziologických termoregulačních mechanismů	7
1.2 Metody stanovení objemu a povrchu těla.....	9
1.2.1 Model dle Ruffa	9
1.2.2 Model dle Crosse, Collarda a Nelsona.....	10
1.2.3 Model dle Kasabové a Hollidaye	10
1.2.4 Limity stávajících modelů.....	12
2 Cíle práce.....	12
3 Materiál a metody.....	12
3.1 Model.....	12
3.2 Soubor.....	16
3.3 Antropometrie.....	17
3.4 Chyba měření.....	19
3.5 Statistická analýza	20
4 Výsledky.....	20
4.1 Odhad povrchu těla.....	20
4.2 Odhad objemu těla.....	22
4.3 Odhad hmotnosti těla.....	23
4.4 Odhad povrchu segmentů	24
4.5 Odhad objemu segmentů	25
5 Diskuze.....	26
5.1 Odhad povrchu, objemu a hmotnosti těla.....	26
5.2 Srovnání odhadu povrchu, objemu a hmotnosti těla s dalšími modely	26
5.3 Odhad povrchu a objemu segmentů	27

5.4 Využití multisegmentového modelu pro studium termoregulace.....	28
5.5 Limity práce.....	29
6 Závěr.....	30
7 Použitá literatura	31
8 Přílohy	39
8.1 Tabulky.....	39
8.2 Grafy.....	44
8.3 Obrázky	67

1 Úvod

Povrch a objem těla je spojován s otázkou termoregulace již více než sto let (Allen, 1877; Bergmann, 1847) stejně tak jako snahy o odhad povrchu těla (Cross et al., 2008; DuBois & DuBois, 1915, 1916; Gehan & George, 1970; Haycock et al., 1978; Kasabova & Holliday, 2015; Ruff, 1991; Yu et al., 2010). Existuje množství rovnic pro odhad celkového povrchu těla, ale objevují se i modely, které odhadují povrch těla a tělesných segmentů za využití geometrických těles (Cross et al., 2008; Kasabova & Holliday, 2015; Ruff, 1991). Modely využívající geometrických těles znázorňujících jednotlivé tělesné segmenty se označují jako multisegmentové modely lidského těla (Kasabova & Holliday, 2015). Multisegmentové modely tedy slouží k odhadu povrchu těla, objemu těla a tělesné hmotnosti a umožňují kvantifikovat vliv tělesných proporcí na výsledný odhad tělesného povrchu, objemu a tělesné hmotnosti (Kasabova & Holliday, 2015).

Ekogeografická pravidla, především Allenovo pravidlo (Allen, 1877; Ruff, 1994) a Bergmannovo pravidlo (Bergmann, 1847; Ruff, 1994), ukazují na možný vztah tělesné velikosti, tělesných proporcí a termoregulace organismu. Teplokrevní živočichové z chladného prostředí mají menší poměr povrchu těla ku tělesnému objemu a teplokrevní živočichové z teplého prostředí mají větší poměr povrchu ku objemu těla (Blackburn & Hawkins, 2004; Kasabova & Holliday, 2015; Mayr, 1956). Větší poměr povrchu ku objemu těla, a tedy relativně větší povrch těla, vede k větším ztrátám tepla povrchem těla pomocí radiace, konvekce a evaporace než u organismů s menším povrchem těla (Cross & Collard, 2011; Ruff, 1993). Kromě různého poměru povrchu a objemu těla má člověk další adaptace k zabránění přehřátí organismu jako je například zvýšená schopnost pocení ve srovnání s ostatními savci či vysoká vzpřímená postava (Lieberman, 2015).

U anatomicky moderního člověka lze sledovat rozdíly v tělesných proporcích a v poměru povrchu těla k tělesnému objemu vzhledem k zeměpisné šířce (Kasabova & Holliday, 2015; Ruff, 1991, 1993). Pomocí odhadu povrchu těla, objemu těla a jednotlivých tělesných segmentů lze modelovat tepelnou bilanci během lokomoce (Cross et al., 2008). Odhad povrchu těla na základě kosterního materiálu navíc umožní sledovat jak změny tělesných proporcí v evoluci ovlivnili poměr povrchu a objemu těla (Cross & Collard, 2011; Ruff, 1991, 1993). Jelikož existují hypotézy spojující termoregulaci s výraznými změnami tělesných proporcí v průběhu evoluce (Churchill, 1998; Ruff, 1991; Trinkaus, 1981), je možné, že modelování termoregulace bude mít vliv na pohled na evoluci člověka (Hora et al., 2020).

1.1 Termoregulace v evoluci člověka

Homininé se v průběhu své evoluční historie měnili z hlediska své velikosti, tvaru těla i fyziologie a mnohé z těchto změn mohou být přisuzovány adaptaci na klima a být tak ovlivněny termoregulací (Carrier et al., 1984; Collard & Cross, 2017; Ruff, 1994). Abychom ale mohli rekonstruovat změny ve fyziologii a tělesné stavbě, je vhodné znát klimatické podmínky, ve kterých docházelo k vývoji člověka, jelikož rekonstrukce prostředí je asociovaná s evolucí morfologie, termofyziologie i chování (Churchill, 1998; Elton, 2008; Passey et al., 2010; Steegmann et al., 2002). Jelikož nejstarší nálezy řazené k rodu *Homo* byly objeveny ve východní Africe před necelými třemi miliony let (Bobe & Behrensmeyer, 2004; Hill et al., 1992), je podstatná rekonstrukce pliocenního a pleistocenního klimatu této oblasti, jakožto i znalost tělesné stavby a fyziologie předků rodu *Homo*.

Zhruba v době před třemi až dvěma a půl miliony lety můžeme v Africe pozorovat ochlazování klimatu a aridifikaci (Bonnefille, 1983; DeMenocal, 1995) s vlhkými fázemi každých 800 tisíc let a obdobími, která byla klimaticky vysoce variabilní (Trauth et al., 2007). Nižší vlhkost vzduchu se v oblasti východní Afriky projevovala postupným vznikem otevřené savany s přítomností sezónních srážek namísto zapojeného tropického deštného lesa (Bobe & Behrensmeyer, 2004; DeMenocal, 1995; Levin et al., 2004) a nárůstem výskytu C₄ rostlin (Levin et al., 2004; Wynn, 2004). Teplota ve východní Africe ale nemusela klesat tak, jak usuzoval například Bonnefille (1983). Analýza uhličitánů v paleosolu na území povodí Turkany naznačuje, že teplota půdy v této oblasti za poslední 4 miliony let byla vyšší než 30 °C a často i vyšší než 35 °C (Passey et al., 2010). Tyto vysoké teploty by mohly být významné z hlediska teorií vysvětlujících původ adaptací člověka na horké klima (Passey et al., 2010).

Jednou z prvních adaptací na horké klima by mohla být bipedie (Wheeler, 1984). Podstatnou výhodou bipedie v teplých podmínkách je menší získávání tepla ze slunečního záření, jelikož je mu vystaven menší povrch těla (Wheeler, 1984, 1991). Tato výhoda bipedie by byla ještě umocněna později v prostředí africké savany (Wheeler, 1984, 1991), nicméně předpokládá se forma bipední lokomoce již u hominoidů, kteří obývali zalesněné prostředí (Böhme et al., 2019; Lovejoy et al., 2009). Díky bipedii by později v prostředí africké savany také došlo k usnadnění disipace tepla do okolí pomocí evaporace, jelikož by byla větší část povrchu těla vystavena nad vegetační pokryv, kde je vyšší rychlost vzduchu, nižší teplota vzduchu a nízká vlhkost (Wheeler, 1985, 1991).

Člověk a jeho předchůdci se přizpůsobovali nejen klimatickým podmínkám, ale svou roli měl i způsob lokomoce či subsistenční strategie. Názornou ukázkou je vytrvalostní běh, který

přináší strukturální i fyziologické změny nejen z hlediska termoregulace kvůli vysoké produkci endogenního tepla, ale také z hlediska energetiky, síly a stabilizace (Bramble & Lieberman, 2004; Carrier et al., 1984). Díky těmto změnám je člověk schopen vytrvalostního běhu i ve vysokých teplotách na rozdíl od dalších savců (Carrier et al., 1984; Dill et al., 1932). Vytrvalostní běh je podstatným faktorem z hlediska selekce nejen kvůli změnám v tělesné stavbě, ale také proto jak dlouho člověk využívá tento typ lokomoce. Přestože některé znaky spojené s vytrvalostním během lze pozorovat už na nálezech řazených k rodu *Homo habilis*, většinu strukturálních změn spojených s vytrvalostním během nalézáme u kostry raného *Homo erectus* (Bramble & Lieberman, 2004), který se objevuje v Africe před zhruba 1,8 miliony let (Antón, 2003). Na kostře KNM-WT 15000, řazené právě k druhu *Homo erectus*, můžeme navíc pozorovat výraznou změnu tělesných proporcí oproti předchozím druhům homininů (Ruff, 1991, 1993). Touto změnou je nárůst celkové výšky při zachování téměř nezměněné šířky postavy a tedy lineárnější tvar postavy, což je možný mechanismus vhodný k disipaci endogenního tepla při vytrvalostním běhu, především v horkém a suchém prostředí (Bramble & Lieberman, 2004; Ruff, 1991). Není však jasné, zdali již v této době byly přítomny jiné adaptace, které mohou mít spojitost s ochlazováním těla, jako například ztráta srsti či zmnožení potních žláz usnadňujících evapotranspiraci, jelikož z fosilního záznamu nelze určit, kdy se tyto znaky vyvinuly (Bramble & Lieberman, 2004; Carrier et al., 1984; Wheeler, 1991). Aby však *Homo erectus* mohl využívat vytrvalostní běh, musel by mít schopnost pocení na podobné úrovni jako moderní člověk a také podobné rozložení a množství srsti (Ruxton & Wilkinson, 2011).

V rámci současné lidské populace ovšem nenacházíme pouze adaptace na suché a teplé klima primárního prostředí či na vytrvalostní běh. Lidská populace se během své evoluční historie rozšířila do mnoha různých prostředí, které vyžadovali další selekci jak z hlediska adaptací na teplotu a vlhkost daného prostředí, tak i z hlediska změny subsistenční strategie (Lieberman, 2015; Montagu, 1964). I přesto je základní adaptace na dlouhodobou námahu v horkém prostředí zachována a na původ člověka v tropickém prostředí existuje mnoho indikací (Lieberman, 2015; Montagu, 1964). Člověk v rámci své evoluce má dvě hlavní možnosti adaptace na klima a svou subsistenční strategii, a to změnou tělesných proporcí a fyziologickou změnou termoregulačních mechanismů.

1.1.1 Změna tělesných proporcí

V lidské evoluci docházelo k postupným více či méně výrazným změnám v tělesných proporcích. Pro možné vysvětlení těchto změn z hlediska termoregulace se často uplatňují

takzvaná ekogeografická pravidla, především Allenovo a Bergmannovo pravidlo (Ruff, 1993). Allenovo pravidlo udává, že populace daného druhu žijící v chladnějším prostředí má kratší končetiny či výběžky, což vede ke zmenšení poměru povrchu těla ku tělesné hmotnosti (Allen, 1877; Ruff, 1994). Ke zmenšení poměru povrchu těla ku tělesné hmotnosti dojde i při interpretaci Bergmannova pravidla, které říká, že v chladnějším prostředí je populace daného druhu větší než populace obývající teplejší prostředí (Bergmann, 1847; Ruff, 1994). Právě změna poměru povrchu těla k tělesné hmotnosti se ukazuje jako klíčová z hlediska termoregulace, a to jak z hlediska odvodu tepla, tak i udržení tělesné teploty (Ruff, 1993).

Abychom byli schopni rekonstruovat změny v tělesných proporcích a jejich případný vztah k termoregulaci, musíme nejprve znát proporce předchůdců člověka, ideálně až k poslednímu společnému předku homininů a šimpanzů, stejně jako prostředí a způsob lokomoce těchto druhů. Poslední společný předek šimpanzů a homininů žil zhruba před šesti až sedmi miliony lety (Steiper & Young, 2006) v arboreálním prostředí Afriky (Elton, 2008). Způsob lokomoce posledního společného předka není jasný, ale na základě nálezů *Ardipithecus ramidus* se usuzuje, že se mohlo jednat o palmigrádního kvadrupeda, který, ačkoli se pohyboval v arboreálním prostředí, nevyužíval způsob lokomoce jako dnešní hominoidi (Lovejoy et al., 2009; Simpson et al., 2019; White et al., 2015). Pozdější *Ardipithecus ramidus* pravděpodobně preferoval zalesněné prostředí, ne však tropický deštný les (White et al., 2015). Jelikož měl relativně dlouhé horní končetiny a krátké dolní končetiny vzhledem k trupu, lze říci, že proporce jeho končetin byly odlišné od anatomicky moderního člověka, což je často zdůvodňováno typem arboreální lokomoce, kterou vykonával spolu s bipedií (White et al., 2015). Fylogeneticky nejbližší k *Ar. ramidus* má rod *Australopithecus* a posloupnost můžeme sledovat až k druhu *Australopithecus afarensis* (White et al., 2015). Kostra AL 288–1, která je řazena právě k druhu *Australopithecus afarensis*, ukazuje, že tento druh byl pravděpodobně malého vzrůstu, v porovnání s anatomicky moderním člověkem, (Jungers, 1988) s relativně velkou bikristální šířkou pánve vzhledem k výšce postavy (Ruff, 1993). Spojení malé výšky postavy s šířkou pánve srovnatelnou s pozdějšími *Homo erectus* či anatomicky moderním člověkem vedlo k poměru povrchu těla ku tělesné hmotnosti, který je srovnatelný s pozdějším *Homo erectus* (Ruff, 1993). Pokud by došlo k nárůstu výšky postavy tak, aby výška AL 288–1 byla shodná s výškou KNM–WT 15000, pak by při proporcionálním zvětšení bikristální šířky pánve došlo ke zmenšení poměru povrchu těla ku tělesné hmotnosti, což by bylo maladaptivní na tropické klima (Ruff, 1993). Pouhý proporční nárůst velikosti těla se tedy z hlediska termoregulace nezdá být výhodný. Nárůst velikosti těla při zachování poměru povrchu těla ku objemu se jeví jako vhodný kompromis mezi nutností odvádět velké

množství tepla z těla pomocí velkého povrchu těla v teplé klimatické oblasti a zároveň potřebou většího tělesného objemu, který by byl vhodný například kvůli zabránění dehydrataci jedince (Hora et al., 2020). Odhad povrchu těla u AL 288–1 (Ruff, 1993) byl proveden na základě odhadované výšky těla a odhadované hmotnosti za použití rovnice dle DuBois a DuBois (DuBois & DuBois, 1916). Rovnice dle DuBois a DuBois byla vytvořena pro odhad povrchu těla u anatomicky moderního člověka (DuBois & DuBois, 1916), neuvažuje tedy možný efekt, jaký by mohly mít odlišné tělesné proporce na odhadovaný povrch těla. Výhodou australopitéků z hlediska termoregulace by ovšem mohla být bipedie, která vede nejen ke zmenšení množství tepla získaného radiací, ale navíc umožňuje snazší odvod tepla do okolí (Wheeler, 1984). Proporce končetin jsou u různých druhů australopitéků nejasné, ale u druhu *Australopithecus afarensis* se zdá, že horní končetina má proporce podobné anatomicky modernímu člověku, zatímco dolní končetina je relativně kratší, než je tomu u anatomicky moderních lidí (Jungers, 1982). Pozdější *Homo habilis* má relativně dlouhé horní končetiny a krátké dolní končetiny, má tedy stále ještě proporce podobné spíše africkým lidoopům či orangutanům než anatomicky modernímu člověku (Hartwig-Scherer & Martin, 1991; McHenry & Berger, 1998). Jak již bylo zmíněno, k výrazné změně tělesných proporcí došlo u druhu *Homo erectus*, u kterého lze předpokládat, že se tak alespoň částečně stalo z důvodu zefektivnění odvodu tepla zvětšením tělesného povrchu v teplém a suchém prostředí a tedy, že jeho tělesné proporce odpovídají adaptaci na teplé klima (Collard & Cross, 2017; Ruff, 1991).

Neandertálci jsou často spojováni s přizpůsobením na chladné klima glaciální Evropy (Collard & Cross, 2017; Holliday, 1997). Neandertálce lze považovat za poměrně robustní (Churchill, 2014) s mediolaterálně a anteroposteriorně rozšířeným hrudním košem a větší bikristální šířkou pánve (Churchill, 1998; Ruff, 1991, 1993), což by odpovídalo přizpůsobení se nižším teplotám podle Bergmannova pravidla (Churchill, 1998; Holliday, 1997; Trinkaus, 1981). Dle poměrů kosti vřetenní (*radius*) ku kosti pažní (*humerus*), kosti holenní (*tibia*) ku kosti stehenní (*femur*), či dle poměru distálního segmentu končetiny k trupu lze určit, že měli relativně kratší distální segmenty končetin, ale také relativně kratší končetiny celkově, ve srovnání s anatomicky moderním člověkem (Holliday, 1997; Trinkaus, 1981). Ačkoli vliv z hlediska termoregulace měla spíše celková délka končetin než pouze délka distálních segmentů (Tilkens et al., 2007), krátké končetiny souhlasí s adaptací na chladné klima dle Allenova pravidla (Churchill, 1998; Trinkaus, 1981). Pokud bychom srovnali poměr bikristální šířky pánve ku výšce neandertálců a současných populací anatomicky moderního člověka, nalezneme největší podobnost se současnými populacemi Evropy a severní Asie

(Ruff, 1991). V případě srovnání poměru délky kosti holenní ku délce kosti stehenní by neandertálci opět spadali blíže k současným populacím z vyšších zeměpisných šířek (Ruff, 1993). Neandertálské proporce končetin i podsaditost spojená se zmenšením poměru povrchu ku objemu těla naznačují možnou adaptaci na chladné klima, ve kterém by jim jejich tělesná stavba poskytovala termoregulační výhodu (Ruff, 1991, 1993). Zda však morfologie neandertálců je skutečně dána adaptací na nízké teploty glaciálu je nejisté vzhledem k alternativním hypotézám (Higgins & Ruff, 2011; Stewart, 2007; Trinkaus, 1981).

U anatomicky moderních lidí jsou pozorovány rozdíly v tělesné stavbě, které jsou často vztahovány k zeměpisné šířce či obecněji ke klimatu, a jejichž existence by tím pádem mohla být dána selekcí za uplatnění ekogeografických pravidel. Jsou pozorovány rozdíly v tělesné stavbě mezi subsaharskými obyvateli Afriky (především nilotickou skupinou) a obyvateli severských oblastí (Ruff, 1993). Podíváme-li se na bikristální šířku pánve, nalezneme silnou korelaci se zeměpisnou šířkou (Ruff, 1991). Obyvatelé chladnějšího prostředí nejen, že mají celkově větší bikristální šířku pánve než obyvatelé tropických oblastí, ale bikristální šířka pánve je relativně málo různorodá vzhledem k výšce postavy (Ruff, 1991, 1993). Totéž platí pro obyvatele tropických oblastí, jejichž bikristální šířka pánve je mezi jedinci podobná opět bez ohledu na výšku postavy. (Ruff, 1991, 1993). Podíváme-li se na proporce končetin, můžeme pozorovat, že populace žijící v teplejším prostředí mají relativně delší končetiny vzhledem k trupu, než populace žijící v chladnějším prostředí (Ruff, 1993, 1994). To odpovídá přizpůsobení dle Allenova pravidla a zvětšuje poměr povrchu těla ku tělesné hmotnosti v teplém prostředí, což umožňuje lepší disipaci tepla (Ruff, 1994; Tilkens et al., 2007). Obyvatelé tropických oblastí tedy mají menší bikristální šířku pánve, relativně delší končetiny, a díky menší šířce těla a větší výšce těla lineárnější tvar postavy (Ruff, 1993). Obyvatelé tropických oblastí mají také větší poměr povrchu ku objemu těla ve srovnání s obyvateli severnějších oblastí (Ruff, 1993). Z hlediska termoregulace jsou tak tedy obyvatelé z teplejších oblastí lépe přizpůsobeni na odvod tepla, zatímco obyvatelé chladnějších oblastí dokáží lépe udržet tělesnou teplotu (Ruff, 1993). Existují ovšem i jiná vysvětlení pro změny v postkraniálním skeletu spojené se zeměpisnou šířkou než jen čistě adaptace z hlediska termoregulace (Holliday & Ruff, 2001; Porter, 1999; Roseman & Auerbach, 2015).

Současné populace anatomicky moderního člověka však nejsou z hlediska své tělesné stavby ovlivňovány pouze teplotou, ale také vlhkostí daného prostředí. V tropických deštných lesích se setkáváme s populacemi, které se svými tělesnými proporcemi a malým vzrůstem značně odlišují od jiných populací žijících v podobných zeměpisných šířkách (Meazza et al.,

2011; Perry & Dominy, 2009). Tělesné proporce těchto populací bývají vysvětlovány pomocí termoregulace. Ačkoli v takto zalesněném prostředí člověk nezískává mnoho tepla z přímého slunečního záření (Ruff, 1993), i přesto je nutné teplo odvádět do okolí. Možnosti pro odvod tepla povrchem těla jsou zde značně limitované, a to nejen kvůli nízkému pohybu vzduchu, ale také kvůli vysoké vzdušné vlhkosti, která značně omezuje účelnost ztráty tepla evaporací (Cavalli-Sforza, 1986; Perry & Dominy, 2009; Ruff, 1993). Zmenšením velikosti těla by se zmenšilo množství endogenně produkovaného tepla, a jelikož ve vlhkém a teplém prostředí je ztráta tepla pomocí tělesného povrchu limitována, je omezení produkce tepla účinným způsobem, jak zabránit přehřátí organismu (Cavalli-Sforza, 1986; Ruff, 1993). Změna tělesných proporcí těla je zde způsobena nutností menšího tělesného objemu (a navíc zvětšení poměru povrchu ku objemu těla dle Bergmannova pravidla) při omezené schopnosti odvodu tepla kvůli vysoké vzdušné vlhkosti (Cavalli-Sforza, 1986; Ruff, 1993). Ačkoli množství prací bylo založeno na studiu kmenů z tropických lesů střední Afriky, nalezneme podobné populace také na Filipínách, Nové Guinei, tropických oblastech Ameriky, v Asii či v jižní Africe, kde není vždy vysoká teplota a vlhkost vzduchu (Diamond, 1991). Termoregulace je tedy jen jedno z možných vysvětlení této tělesné stavby vyznačující se malým vzrůstem (Diamond, 1991; Migliano et al., 2007; Perry & Dominy, 2009).

1.1.2 Evoluce fyziologických termoregulačních mechanismů

Nejen tělesné proporce se v rámci lidské evoluce měnily, ale došlo i ke vzniku fyziologických mechanismů pro ztrátu či udržení tělesné teploty. Obecně lze říci, že je velice těžké určit, kdy ke vzniku jednotlivých mechanismů došlo, a jak se měnily v čase, jelikož nezanechávají stopy na fosilním materiálu (Bramble & Lieberman, 2004; Carrier et al., 1984; Sutou, 2012). Jako klíčové se jeví redukce srsti či ochlazování těla pomocí evaporace.

Anatomicky moderní člověk má ve srovnání s ostatními suchozemskými savci menší pokryv srstí kvůli malému průměru chlupu a jeho malé délce, a to i přesto, že má podobné množství folikulů jako ostatní lidoopi (Allen et al., 2013; Kamberov et al., 2018; Wheeler, 1984). Podíváme-li se na hominoidy, můžeme pozorovat stále menší relativní hustotu srsti danou hustotou chlupů na jednotku povrchu těla s rostoucím povrchem těla (Schwartz & Rosenblum, 1981). Tato nepřímá úměrnost by mohla být dána termoregulací, jelikož menší poměr povrchu ku objemu těla u větších zástupců této nadčeledi by byl kompenzován méně hustou srstí, což by usnadnilo odvod tepla kondukcí do okolního prostředí (Carrier et al., 1984; Schwartz & Rosenblum, 1981). Pokud by toto vysvětlení odpovídalo realitě, je pravděpodobné, že vzhledem k relativní hustotě srsti indikované odhadovanou hmotností

australopitéků by již u nich mohlo dojít ke ztrátě srsti (Schwartz & Rosenblum, 1981). Tomu odpovídá i hypotéza, že ztráta srsti předcházela divergenci vší rodu *Pthirus*, vší muňce (*Pthirus pubis*), která žije v pubickém ochlupení člověka a gorilí vší (*Pthirus gorillae*), zhruba před třemi až čtyřmi miliony lety (Allen et al., 2013; Reed et al., 2007). Ztráta výrazného pokryvu těla srstí by však mohla nastat ještě dříve, a to jedinou mutací u posledního společného předka lidí a šimpanzů, a předcházela by tak přechodu k bipednímu způsobu lokomoce, ke kterému by došlo kvůli nutnosti transportu potomků pomocí horních končetin (Sutou, 2012). Ovšem je zde i protikladná myšlenka, podle které ke ztrátě srsti mohlo dojít až po vzniku vzpřímeného postoje (Wheeler, 1984). Ten vystavil menší povrch těla slunečnímu záření a již zde nebyl selekční tlak pro ochranu proti tomuto záření vrstvou srsti (Wheeler, 1984). Ztráta srsti měla pravděpodobně i dopady, jako například vznik podkožního tuku jako nového způsobu tepelné izolace těla (Wheeler, 1984).

Přestože bipední postoj zmenšil povrch těla, na který dopadá přímé sluneční záření v době, kdy je slunce více než 40 ° nad horizontem, existují i názory, že ztráta srsti vedla k nutnosti odvodu tepla získaného radiací pomocí pocení (Newman, 1970; Schwartz & Rosenblum, 1981; Wheeler, 1984). Existují naopak i předpoklady, že ztráta srsti následovala až po vzniku pocení jako zefektivnění evaporace (Montagu, 1964). Pocení je aspekt lidské fyziologie, který umožňuje ztrátu tepla evaporací vody z povrchu těla, a proto je z tohoto hlediska výhodnější větší povrch těla, který není krytý srstí (Carrier et al., 1984; Lieberman, 2015; Newman, 1970). Pro člověka jsou klíčové ekrinní žlázy, které tvoří téměř 100 % všech kožních žláz (Lieberman, 2015). Navíc jsou ekrinní žlázy řízeny neurálně s cholinergními receptory, což umožňuje jemnější neurální kontrolu a mají u člověka vysokou úroveň sekrece (Carrier et al., 1984; Lieberman, 2015). Člověk má dva až pět milionů ekrinních žláz (Jablonski, 2010). Takto velké množství může být dáno i tím, že ztrátou srsti člověk uvolnil místo pro ekrinní žlázy (Sutou, 2012). Ovšem i bez zmenšení hustoty folikulů v kůži mohlo dojít k zvýšení schopnosti pocení díky zvětšení zásob glykogenu v ekrinních žlázách a kapilarizaci (Best & Kamilar, 2018). K zvýšení schopnosti pocení by tedy mohlo dojít již u australopitéků (Best & Kamilar, 2018). K dalšímu zefektivnění pocení na úroveň anatomicky moderního člověka pravděpodobně došlo současně se vznikem vytrvalostního běhu, který navíc vyžaduje i podobnou míru osrstění jako u anatomicky moderního člověka (Best & Kamilar, 2018; Ruxton & Wilkinson, 2011). Kombinace velkého počtu inervovaných cholinergních potních žláz v kombinaci se ztrátou srsti vede k vysokým ztrátám tepla pomocí kondukce a evaporace (Carrier et al., 1984).

1.2 Metody stanovení objemu a povrchu těla

U předků anatomicky moderního člověka, jakožto i u jeho současných populací, jsme sledovali především změny tělesných proporcí, které měly vliv na objem a povrch těla. Abychom však byli schopni soudit vzájemný vztah povrchu a objemu těla, který se podle ekogeografických pravidel zdá být klíčový, musíme hodnoty povrchu a objemu těla nejprve stanovit.

Snahy o stanovení povrchu těla jsou zde již více než sto let (DuBois & DuBois, 1915, 1916). V práci DuBois a DuBois (1916) je uvedena v našem kontextu často používaná rovnice pro stanovení povrchu těla:

$$\text{povrch těla} = (\text{hmotnost těla}^{0,425} \cdot \text{výška těla}^{0,725}) \cdot 0,007184. \quad (1)$$

V této rovnici je pro výpočet povrchu a objemu těla zapotřebí tělesné hmotnosti a výšky. Tuto rovnici budeme označovat jako model DuBois. Tato rovnice byla testována na 10 jedincích, jejichž povrch byl získán pomocí rozstříhání formy těla, tak aby mohla být rozprostřena do roviny a jejím přenesením na fotografický papír. Následně byly obrysy formy vystříhány z fotografického papíru, u kterého byla určena plocha každého gramu, a zváženy.

Pro stanovení objemu těla je zapotřebí znát hustotu těla, tedy poměr hmotnosti a objemu. Objem (V) lze vypočítat na základě rovnice:

$$V = \frac{m}{\rho}, \quad (2)$$

kde m značí hmotnost těla a ρ značí jeho hustotu. Hustota lidského těla je však proměnlivá v závislosti na věku či tělesném složení (Krzywicki & Chinn, 1967).

1.2.1 Model dle Ruffa

K odhadu povrchu těla lze použít model vytvořený Christopherem Ruffem v roce 1991 (Ruff, 1991). Model budeme označovat jako Ruff a je znázorněn na obrázku 1. Tento model je možné využít pro odhad povrchu i z kosterního materiálu (Kasabova & Holliday, 2015; Ruff, 1991). Lidské tělo je v tomto případě modelováno jako válec s kruhovou podstavou a povrch (S_{Ruff}) je tedy počítán dle vzorce:

$$S_{Ruff} = 2\pi r_1(r_1 + v_{t\acute{e}lo}), \quad (3)$$

kde $v_{t\acute{e}lo}$ je tělesná výška a r_1 odpovídá polovině bikristální šířky pánve. Objem (V_{Ruff}) je vypočítán dle vzorce:

$$V_{Ruff} = \pi r_1^2 v_{t\acute{e}lo}. \quad (4)$$

Model ovšem nijak nezohledňuje tělesné proporce jako například délku horních končetin či podíl, který mají dolní končetiny na celkové výšce postavy, a tedy poměr délky dolních

končetin k výšce trupu. K ověření odhadu povrchu tohoto modelu byla použita rovnice dle DuBois a DuBois (1916).

1.2.2 Model dle Crosse, Collarda a Nelsona

Další model pro odhad povrchu těla je od týmu Alana Crosse (Cross et al., 2008; Cross & Collard, 2011). Tento model zobrazený na obrázku 2 budeme označovat jako model Cross. Aplikace modelu Cross na kosterní materiál je komplikovaná kvůli použití obvodových měř, které jsou dány měkkými tkáněmi. V tomto modelu je tělo rozděleno na 15 segmentů, konkrétně na hlavu, krk, trup, paže, předloktí, ruce, stehna, bérce a nohy. Všechny segmenty jsou modelovány jako válce bez podstav. U každého segmentu byla stanovena jeho výška a obvod. Obvod autoři definují jako průměr tří různých obvodů daného segmentu, konkrétně proximálního, středního a distálního obvodu. Obvody a výšky segmentů byly popsány v práci Gordon a kolektiv (1989). Povrch segmentu (S) je vypočítán dle vzorce:

$$S = ov, \quad (5)$$

kde o je obvod daného segmentu získaný zprůměrováním proximálního, středního a distálního obvodu a v je výška daného segmentu. Výsledný povrch těla byl získán jako součet povrchů všech 15 segmentů těla. Model byl vytvořen a testován na 7 jedincích. Tento model byl ověřován rovnicí dle DuBois a DuBois (1916).

1.2.3 Model dle Kasabové a Hollidaye

K odhadu objemu a povrchu byl vyvinut model Boryanou Kasabovou a Trentonem Hollidayem (Kasabova & Holliday, 2015). Tento model budeme označovat jako model Kasabova a je znázorněn na obrázku 3. Tento model byl vyvinut k použití na kosterním materiálu. V tomto modelu je tělo rozděleno na 7 segmentů, kterými jsou trup, stehno, bérec a část horní končetiny tvořená paží a předloktím. Trup, bérec a část horní končetiny daná paží a předloktím jsou modelovány jako válec a stehno je modelováno jako komolý kužel. Segmenty hlavy, krku, rukou a nohou nejsou nijak modelovány. K aplikaci tohoto modelu je zapotřebí 9 rozměrů: výška těla, maximální délka kosti pažní (M_1), biepiekondylární šířka kosti pažní (M_4), maximální délka kosti vřetenní (M_1), bikristální šířka pánve (M_2), bikondylární délka kosti stehenní (M_2), biepiekondylární šířka kosti stehenní (M_{21}), maximální délka kosti holenní (M_{1a}) a bikondylární šířka kosti holenní (M_3). Další potřebné rozměry byly vypočteny. Délka horní končetiny byla dána součtem maximální délky kosti pažní a maximální délky kosti vřetení. Výška *akromionu* od země (AcH) byla dána pomocí vzorce:

$$AcH = 0,8384 v_{t\ddot{e}lo} - 3,2201. \quad (6)$$

Výška vnitřního kotníku od země byla získána jako 4,67 % tělesné výšky. Kosterní bikristální šířka pánve (BiB) v tomto modelu je převáděna na hodnoty odpovídajícím měřením na živých jedincích ($LBiB$) pomocí rovnice dle Ruff a kolektiv (1997):

$$LBiB = 1,17 BiB - 3. \quad (7)$$

Následně byla vypočtena bitrochanterická šířka ($BtrW$) pomocí vzorce:

$$BtrW = 0,5884 LBiB + 15,754. \quad (8)$$

Délka dolní končetiny byla dána součtem bikondylární délky kosti stehenní, maximální délky kosti holenní a výšky vnitřního kotníku od země.

Segment trupu byl modelován jako válec. Podstavy tohoto válce nebyly započteny. Poloměr trupu byl roven polovině bikristální šířky pánve žijících jedinců. Výška trupu byla dána odečtením délky dolní končetiny od výšky *akromionu* od země.

Stehno bylo modelováno jako komolý kužel bez podstav. První poloměr stehna byl roven jedné čtvrtině bitrochanterické šířky a druhý poloměr odpovídá polovině biepickondylární šířky kosti stehenní. Výška stehna byla rovna bikondylární délce kosti stehenní.

Pro modelování bérce byl použit válec. Podstavy tohoto válce nebyly započteny. Poloměr bérce odpovídá polovině bikondylární šířky kosti holenní výška je rovna maximální délce kosti holenní.

Horní končetina byla modelována jako jeden válec. Z důvodu započtení ramene byla zachována jedna podstava válce a druhá nebyla započtena. Poloměr odpovídá polovině biepickondylární šířky kosti pažní a výška je dána součtem maximální délky kosti pažní a maximální délky kosti vřetenní.

Celkový povrch těla byl dán sečtením povrchu segmentů s tím, že segmenty končetiny byly vždy započítány dvakrát. Celkový objem těla byl získán sečtením objemů jednotlivých segmentů, kdy segmenty končetin byly započteny dvakrát. Následně byl celkový objem těla vynásoben hodnotou $1,1 \text{ g/cm}^3$, což odpovídá průměrné hustotě lidského těla bez tukové tkáně, a následně vydělen tisícem, aby výsledná hodnota byla v kilogramech. Poté byla přičtena průměrná hmotnost segmentů, které nebyly součástí modelu. Hmotnost hlavy, krku, rukou a nohou byla průměrně 8,77 kg, v rozsahu od 4,98 do 9,53 kg, což odpovídá 11,2 % celkové hmotnosti. Spolehlivost modelu byla testována za využití odhadované výšky a hmotnosti. Odhadovaný povrch těla byl srovnáván s povrchem těla, jehož hodnota byla získána jako průměrná hodnota z rovnic pro odhad povrchu těla z výšky a hmotnosti. Použité rovnice byli od DuBois a DuBois (1916), Gehan a George (1970), Haycock a kolektiv (1978) a Yu a kolektiv (2010). Odhad povrchu těla i tělesné hmotnosti byl analyzován pomocí regresní analýzy redukované hlavní osy (dále jen RMA z anglického *Reduced Major Axis*).

1.2.4 Limity stávajících modelů

Námi zvolené stávající modely poskytují odhad povrchu a objemu lidského těla, ale ne vždy je možné odhadovat povrch a objem jednotlivých segmentů těla. Odhad povrchu jednotlivých segmentů je možný za využití modelu Cross (Cross et al., 2008) a částečně i za využití modelu Kasabova (Kasabova & Holliday, 2015). Model Kasabova však nepočítá se všemi segmenty (neuvažuje hlavu, krk, ruce a nohy) a segmenty paže a předloktí spojuje v celek, čímž znemožňuje studium významu proporcí horní končetiny. Model Ruff (Ruff, 1991) ani model DuBois (DuBois & DuBois, 1916) neumožňují odhad povrchu tělesných segmentů.

Odhad povrchu a objemu těla na základě kosterních pozůstatků je možný u všech stávajících modelů, ale ne vždy je aplikace modelu na kosterní materiál snadná. Model Cross při aplikaci na kosterní materiál musí využívat přepočtu, kdy na každý centimetr délky kosti odpovídajícího segmentu byla vypočtena průměrná plocha (Cross & Collard, 2011).

Model Cross a model DuBois byly vytvořeny na poměrně malém souboru (sedmi a deseti jedinců) (Cross et al., 2008; DuBois & DuBois, 1916). Odhady povrchu těla modelu Ruff i modelu Cross byly testovány proti odhadu povrchu těla modelu DuBois a model Kasabova byl testován proti čtyřem zprůměrovaným rovnicím pro odhad povrchu těla, což znamená, že odhad povrchu každého z těchto modelů byl testován proti již odhadovanému povrchu. U žádného z modelů nebyl testován odhad povrchu a objemu segmentů.

2 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je vytvoření multisegmentového modelu lidského těla pro odhad povrchu těla, objemu těla, tělesné hmotnosti i povrchu a objemu jednotlivých tělesných segmentů, který půjde aplikovat na žijící jedince i na kosterní pozůstatky. Cílem této práce je také tento model testovat a ověřit tak jeho spolehlivost pro stanovování povrchu, objemu a hmotnosti lidského těla a povrchu a objemu tělesných segmentů na 3D skenech lidského těla. Dalším z cílů této práce je komparace námi vytvořeného modelu s jinými již existujícími modely pro odhad povrchu a objemu lidského těla.

3 Materiál a metody

3.1 Model

Pro vytvoření našeho modelu jsme rozdělili lidské tělo na 13 segmentů, které jsme následně modelovali pomocí geometrických těles. Abychom mohli provést výpočty povrchu a

objemu daných těles, proběhla antropometrická měření ve virtuálním prostředí. Rozměry byly vybírány s ohledem na možnou budoucí aplikaci modelu na kosterní pozůstatky.

Pro modelování hlavy byla zvolena koule. Její poloměr byl získán jako polovina vzdálenosti bodů *glabella* a *opisthokranion*. Následně byl od povrchu koule odečten povrch rovnající se velikosti povrchu podstavy válce, kterým byl modelován krk. Konečný vzorec pro výpočet povrchu hlavy (S_{hlava}) tedy byl:

$$S_{hlava} = 4\pi r_{hlava}^2 - \pi r_{krk}^2, \quad (9)$$

kde r_{hlava} je poloměrem hlavy a r_{krk} poloměrem krku. Pro objem hlavy (V_{hlava}) byl použit vzorec:

$$V_{hlava} = \frac{4}{3}\pi r_{hlava}^3. \quad (10)$$

Krk byl modelován jako válec, jehož výška (v_{krk}) byla stanovená odečtením vzdáleností bodu *gnathion* od země a bodu *cervicale* od země. Poloměr segmentu krk (r_{krk}) byl vypočten z měřeného obvodu krku pomocí vzorce:

$$r_{krk} = \frac{O_{krk}}{2\pi}, \quad (11)$$

kde O_{krk} je obvodem krku. Jelikož obě podstavy válce, kterým byl modelován krk, jsou místa kontaktu s dalším segmentem a nejsou součástí povrchu těla, byl povrch krku (S_{krk}) vypočítán dle vzorce pro povrch pláště válce:

$$S_{krk} = 2\pi r_{krk} v_{krk}. \quad (12)$$

Objem krku (V_{krk}) byl následně vypočítán dle vzorce:

$$V_{krk} = \pi r_{krk}^2 v_{krk}. \quad (13)$$

Trup byl modelován třemi způsoby, a to jako válec s podstavou elipsy, kvádr a válec s kruhovou podstavou. Průřezy trupu proložené obrysy jednotlivých variant jsou znázorněny na obrázku 4. Výška trupu byla stanovena jako rozdíl vzdálenosti bodu *cervicale* od země a součtu výšky segmentu stehna, výšky segmentu bérce a průměru segmentu nohy. Výška trupu byla ve všech variantách našeho modelu shodná. Povrch trupu byl ve všech variantách vypočítán opět jako povrch pláště bez podstav, jelikož plocha podstav by musela být odečtena kvůli návaznosti segmentů krku, paží a steh. První variantou, zobrazenou na obrázku 5, bylo modelování trupu jako válce, jehož podstavou je elipsa. Mediolaterální průměr této elipsy byla bikristální šířka pánve (vzdálenost pravého a levého bodu *iliocristale*). Jako dorsoventrální průměr této elipsy byla použita vzdálenost mezi body *iliospinale anterius* a *iliospinale posterius*, jelikož v oblasti segmentu trupu není jiný vhodný rozměr, který by byl měřitelný i na kostním materiálu. Pro povrch trupu s podstavou elipsy ($S_{trupElipsa}$) byl použit vzorec:

$$S_{trupElipsa} = O_{elipsa} v_{trup}, \quad (14)$$

kde O_{elipsa} je obvodem elipsy a v_{trup} je výškou trupu. Obvod elipsy byl vypočítán dle vzorce:

$$O_{elipsa} = \pi \frac{3}{2} (r_{ml} + r_{dv}) - \sqrt{r_{ml} r_{dv}}, \quad (15)$$

ve kterém r_{ml} je poloměr získaný jako polovina mediolaterálního průměru a r_{dv} je poloměr vypočtený jako polovina dorsoventrálního průměru. Pro objem trupu s podstavou elipsy ($V_{trupElipsa}$) byl použit vzorec:

$$V_{trupElipsa} = \pi r_{ml} r_{dv} v_{trup}. \quad (16)$$

Ve druhé variantě byl pro modelování trupu použit kvádr, jehož šířkou byla bikristální šířka pánve a hloubkou vzdálenost mezi body *iliospinale anterior* a *iliospinale posterior*. Model kvádr je zobrazen na obrázku 6. Povrch pro tuto druhou variantu ($S_{trupKvádr}$) byl vypočten za využití vzorce:

$$S_{trupKvádr} = 2(av_{trup} + bv_{trup}), \quad (17)$$

ve kterém a značí šířku kvádru a b značí hloubku kvádru. Objem ($V_{trupKvádr}$) byl následně vypočítán podle vzorce:

$$V_{trupKvádr} = abv_{trup}. \quad (18)$$

Geometrické těleso zvolené do třetí varianty byl válec, jehož podstavou byl kruh. Model válec je zobrazen na obrázku 7. Poloměrem tohoto kruhu byla polovina bikristální šířky pánve. Pro povrch ($S_{trupVálec}$) byl použit vzorec:

$$S_{trupVálec} = O_{kruh} v_{trup}, \quad (19)$$

kde O_{kruh} je obvod kruhu. Obvod kruhu byl vypočítán pomocí vzorce:

$$O_{kruh} = 2\pi r_{ml}. \quad (20)$$

Pro výpočet objemu ve variantě válec ($V_{trupVálec}$) byl využit vzorec:

$$V_{trupVálec} = \pi r_{ml}^2 v_{trup}. \quad (21)$$

V rovnici 20 a 21 r_{ml} je poloměrem trupu shodným s poloměrem r_{ml} z první varianty modelu trupu.

Segment paže byl modelován pomocí válce, jehož výška byla udána vzdáleností bodů *akromiale* a *radiale*, která byla měřena na pravé i levé straně a následně zprůměrována. Poloměr tohoto válce byl stanoven jako polovina biepidikondylární šířky kosti pažní, která byla opět měřena na obou stranách těla a dále bylo pracováno s průměrem. Povrch podstav nebyl ani v tomto segmentu použit a výsledný vzorec pro výpočet povrchu paže ($S_{paže}$) byl:

$$S_{paže} = 2\pi r_{paže} v_{paže}, \quad (22)$$

kde $r_{paže}$ značí poloměr paže a $v_{paže}$ výšku paže. Objem paže ($V_{paže}$) byl vypočten dle vzorce:

$$V_{paže} = \pi r_{paže}^2 v_{paže}. \quad (23)$$

Předloktí bylo modelováno jako komolý kužel, jehož výška byla získána jako vzdálenost bodů *radiale* a *supracarpale ulnare*. Proximální, a tedy větší poloměr byl získán jako polovina biepickondylární šířky kosti pažní, a byl tak shodný s poloměrem paže. Distální potažmo menší poloměr byl změřen jako vzdálenost bodů *supracarpale ulnare* a *supracarpale radiale*. Měření všech rozměrů probíhalo na pravé i levé končetině a naměřené hodnoty byly následně zprůměrovány. Povrch předloktí ($S_{\text{předloktí}}$) byl vypočítán jako plášť komolého kužele podle vzorce:

$$S_{\text{předloktí}} = \pi(r_{\text{paže}}r_{\text{předloktí}})\sqrt{v_{\text{předloktí}}^2 + (r_{\text{paže}} - r_{\text{předloktí}})^2}, \quad (24)$$

kde $r_{\text{paže}}$ značí proximální poloměr předloktí shodný s poloměrem paže, $r_{\text{předloktí}}$ značí distální poloměr předloktí a $v_{\text{předloktí}}$ je výškou předloktí. Pro výpočet objemu předloktí ($V_{\text{předloktí}}$) byl použit vzorec:

$$V_{\text{předloktí}} = \frac{\pi v_{\text{předloktí}}}{3} (r_{\text{paže}}^2 + r_{\text{paže}}r_{\text{předloktí}} + r_{\text{předloktí}}^2). \quad (25)$$

Segment stehna byl modelován jako válec. Výška stehna byla vypočtena z rozdílu vzdálenosti bodů *iliospinale anterius* od země a *tibiale externum* od země. Z takto získaného hodnoty bylo následně odečteno 7 % délky, aby se získala délka kosti stehenní (Fetter et al., 1967). Z takto stanovené délky kosti stehenní bylo poté odečteno 27 % jeho hodnoty pro získání konečné výšky segmentu stehna, jelikož zhruba tato část kosti stehenní se vyskytuje nad oblastí rozkroku a byla tedy přiřazena k segmentu trupu (Collard & Cross, 2017; Cross et al., 2008). Poloměr stehna byl získán jako čtvrtina bikristální šířky pánve, tedy jako polovina poloměru r_{ml} , použitého při výpočtech segmentu trupu. Povrch tohoto segmentu (S_{stehno}) byl vypočítán pomocí vzorce:

$$S_{\text{stehno}} = \pi r_l v_{\text{stehno}}, \quad (26)$$

kde r_l je poloměrem stehna a v_{stehno} je výškou stehna. Objem stehna (V_{stehno}) byl získán pomocí vzorce:

$$V_{\text{stehno}} = \pi \left(\frac{r_l}{2}\right)^2 v_{\text{stehno}}. \quad (27)$$

Bérec byl modelován jako válec, jehož výška byla stanovena jako rozdíl vzdáleností *tibiale externum* od země a *supratarsale tibiale* od země. Jako poloměr byl použit distální poloměr segmentu stehna, tedy polovina šířky epikondylů kosti stehenní. Povrch ($S_{\text{bérec}}$) byl opět počítán bez podstav, a to podle vzorce:

$$S_{\text{bérec}} = 2\pi r_{\text{epikon}} v_{\text{bérec}}, \quad (28)$$

kde r_{epikon} značí poloměr bérce a $v_{\text{bérec}}$ značí výšku bérce. Pro výpočet objemu ($V_{\text{bérec}}$) byl použit vzorec:

$$V_{\text{bérec}} = \pi r_{\text{epikon}}^2 v_{\text{bérec}}. \quad (29)$$

Segment nohy byl modelován jako půlválec. Výška tohoto půlválce byla stanovená jako vzdálenost bodů *akropodion* a *pterion*. Poloměr byl získán jako polovina výšky bodu *supratarsale tibiale* od země. Z povrchu válce byl odečten obsah kruhu, kterým navazuje na segment nohy segment bérce, zatímco podstavy modelovaného půlválce byly zachovány. Poloměr odčítaného kruhu byl určen jako polovina vzdálenosti *supratarsale tibiale* a *supratarsale fibulare*. Pro výpočet povrchu (S_{noha}) byl použit vzorec:

$$S_{noha} = \pi r_{noha}(r_{noha} + v_{noha}) + 2r_{noha}v_{noha} - \pi r_{kotník}^2, \quad (30)$$

kde r_{noha} je poloměrem půlválce, kterým je modelována noha, v_{noha} je výškou nohy a $r_{kotník}$ značí poloměr kruhu jehož obsah byl odečten kvůli návaznosti segmentu na segment bérce.

Objem tohoto segmentu (V_{noha}) byl určen pomocí vzorce:

$$V_{noha} = \frac{\pi r_{noha}^2 v_{noha}}{2}. \quad (31)$$

Celkový povrch a objem byly získány sečtením dílčích povrchů a objemů jednotlivých segmentů. V případě segmentů končetin byl každý segment započítán dvakrát. Výjimkou byl pouze segment ruky, který započítán nebyl, jelikož nebylo možné ověřit do jaké míry modelovaný segment odpovídá realitě. Obecně lze říci, že povrch ruky tvoří zhruba 2,3 až 2,5 % celkového povrchu těla (Hsu & Yu, 2010; Lee et al., 2007; Yu et al., 2008) a tedy, že ignorujeme zhruba 5 % povrchu těla v závislosti na indexu tělesné hmotnosti (BMI z anglického *body mass index*) jedince. Objem ruky odpovídá 0,65 % celkového objemu (Kasabova & Holliday, 2015). Pro stanovení hmotnosti byla hodnota odhadovaného objemu vynásobena 1,06 g/cm³, což odpovídá průměrné hustotě těla 24 letého muže (Krzywicki & Chinn, 1967).

3.2 Soubor

Pro testování vytvořeného multisegmentového modelu a jeho srovnání s dalšími modely pro odhad objemu a povrchu těla bylo použito 20 3D celotělových skenů mužů. Všichni muži byli ve věku 20 až 30 let, s věkovým průměrem 24 let se známou tělesnou hmotností, která byla v rozsahu od 52,7 kg do 109,8 kg s průměrem 77,8 kg. Soubor je detailněji charakterizován v tabulce 1. Jednalo se převážně o studenty univerzity v Göttingenu (Německo) evropského původu. Všichni probandi byli oblečeni v těsném spodním prádle a stáli rovně s rozkročenými dolními končetinami, horními končetinami odtaženými od těla, dlaněmi v pěst s palci směřujícími vpřed a hlavou v souladu s frankfurtskou horizontálou. Probandi byli instruováni, aby dýchali normálně během skenování, které trvalo zhruba 10 sekund. Každý proband byl skenován třikrát, a to za použití skeneru Vitus^{smart}XXL se softwarem AnthroScan (Human Solutions GmbH, Kaiserslautern, Německo). Hustota bodů

při použití daného skeneru je 300 bodů na cm³. Skeny pořídili Kordsmeyer, Stern a Penke (2019).

3.3 Antropometrie

Rozměry pro výpočet povrchu a objemu segmentů našeho i ostatních modelů, bylo nutné získat antropometrií. Antropometrická měření 3D skenů byla prováděna v programu 3D Measure Up V(2.2) (ProtoTech Solutions, Pune, Maharashtra). Tento program umožňuje měření přímé vzdálenosti dvou bodů, jakožto i měření vzdálenosti dvou bodů po povrchu 3D objektu. Následně disponuje dvěma měřicími plošinami, které lze posouvat a rotovat ve všech směrech a využít tak k měření konkrétních obvodů a také k získání povrchu a objemu části objektu. Před provedením antropometrie ve virtuálním prostředí byla měření provedena u 26 živých jedinců klasickou antropometrií za použití, antropometru, kefalometru, pelvimetru, posuvného měřidla a pásové míry, což usnadnilo identifikaci bodů a rozměrů ve virtuálním prostředí. Všichni probandi měření klasickou antropometrií byli muži s průměrným věkem 29,3 let (21 až 57 let), průměrnou výškou 181,6 cm (od 173,4 cm do 190,1 cm) a průměrnou hmotností 78,3 kg (od 63,7 kg do 95,6 kg). Pro měření byly zvoleny body, které jsou zobrazeny na obrázku 9, dle Knussmann (1988).

Pomocí vzdáleností antropometrických bodů byly následně stanovovány rozměry pro jednotlivé segmenty našeho multisegmentového modelu. Rozměry byly získány přímou vzdáleností nebo jako projekivní míry. V případě horních i dolních končetin byla měření prováděna na obou stranách a následně průměrována. Výška těla byla získána jako vzdálenost bodu *vertex* od země (M 1). Průměr hlavy byl získán jako přímá vzdálenost bodů *glabella* a *opisthokranion* (M 1). Výška krku byla získána rozdílem vzdáleností bodu *gnathion* od země (M 3(1)) a bodu *cervicale* od země (M 19). Výška paže (M 47) byla získána vzdáleností mezi body *akromiale* a *radiale*. Šířka paže byla určena jako biepikondylární šířka paže (M 52(3)) a stanovena vzdáleností bodů *humerales laterales* a *humerales mediales*. Výška předloktí byla stanovena přímou vzdáleností bodů *radiale* a *supracarpale ulnare*. Pomocí vzdáleností *supracarpale radiale* a *supracarpale ulnare* byla získána hodnota použitá jako distální průměr předloktí (M 52(4)). Výška segmentu stehna (M 55) byla stanovena jako projekivní míra a následně upravena. Bylo využito vzdálenosti bodu *iliospinale anterius* od země (M 13) a *tibiale externum* od země, které od sebe byly odečteny. Od výsledné hodnoty bylo odečteno 7 % délky, aby byla získána délka kosti stehenní (Fetter et al., 1967; Knussmann, 1988). Z takto získané délky kosti stehenní bylo odečteno ještě 27 % hodnoty pro získání konečné výšky stehna (Collard & Cross, 2017; Cross et al., 2008). Výška bérce byla získána jako

projektivní míra, a to odečtením vzdálenosti bodu *supratarsale tibiale* od země od vzdálenosti bodu *tibiale externum* od země. Vzdálenost mezi bodem *merion laterale* a *merion mediale* byla použita pro stanovení šířky bérce (M 59d). Vzdálenost vnitřního a vnějšího kotníku (M 59e) byla dána body *supratarsale tibiale* a *supratarsale fibulare* a použita pro odečtení kruhu, kterým je napojen segment bérce k segmentu nohy. Vzdálenost *supratarsale tibiale* od země byla použita jako výška nohy a vzdálenost bodu *akropodion* od bodu *pternion* jako délka nohy (M 58). Výška trupu byla získána pomocí vzdáleností *cervicale* od země (M 19), *iliospinale anterius* od země (M 13) a *tibiale externum* od země. Díky vzdálenostem *iliospinale anterius* od země a *tibiale externum* od země byla stanovena konečná výška stehna, která byla spolu se vzdáleností bodu *tibiale externum* od země odečtena od vzdálenosti bodu *cervicale* od země. Šířka pánve byla dána jako bikristální šířka pánve (M 40), a tedy vzdáleností pravého a levého bodu *iliocristale*. Vzdálenost mezi bodem *iliospinale anterius* a *iliospinale posterius* (M 43(1)) byla použita jako hloubka segmentu trupu.

Kromě lineárních rozměrů jsme získávali i obvodové míry. Označení obvodových měr i dalších rozměrů je dle Knussmanna (1988). Pro náš model byl zapotřebí obvod krku (M63). Obvod krku (M 63) byl použit pro výpočet poloměru krku. Další obvodové míry byly zapotřebí pro model dle Cross a kolektiv (2008). Autoři se v rámci definice a měření obvodových měr i výškových rozměrů odkazují na práci Gordon a kolektiv (1989), která popisuje množství obvodových měr a výškových rozměrů různých segmentů. Ačkoli autoři pracují pro každý segment se třemi obvodovými měrami, ne vždy je tento počet pro daný segment uveden a výšky segmentů zde mnohdy nejsou jasně definovány. V případě, že byla pro daný segment uvedena pouze jedna obvodová míra, použili jsme pouze tu, a když byly uvedeny více než tři, zvolili jsme ty nejčastěji v antropometrii využívané, tak aby zároveň byla jedna proximální, jedna střední a jedna distální. Model dle Cross a kolektiv (2008) uvažuje ještě segment ruky a tedy vyžaduje i její obvod (M 67(2)), jelikož na námi měřených skenech nebyl tento rozměr dostupný, segment ruky jsme nebyli schopni měřit a tedy ani modelovat. Výškové rozměry jednotlivých segmentů byli shodné s námi použitými. Ačkoli autoři model nepoužívají pro odhad objemu, rozhodli jsme se i přesto testovat odhad objemu získaný pomocí definovaných segmentů v tomto modelu. Objem (V) je tedy obecně počítán pomocí vzorce:

$$V = 2\pi r^2 v, \quad (32)$$

ve kterém je r poloměrem daného segmentu. Poloměr (r) byl získán pomocí vzorce:

$$r = \frac{o}{2\pi}. \quad (33)$$

Pro model Ruff (1991) bylo zapotřebí vzdálenosti bodu *vertex* od země (M 1) a bikristální šířky pánve (M 40). U modelu Kasabova (2015) jsme kosterní rozměry nahradili odpovídajícími rozměry na žijících jedincích, s výjimkou bikondylární šířky hosti holenní, která nebyla snadno identifikovatelná ve virtuálním prostředí. Model Kasabova vyžadoval vzdálenost bodu *vertex* od země (M 1). Pro segment horní končetiny bylo zapotřebí délky kosti pažní získané vzdáleností bodů *akromiale* a *radiale* (M 47) a délka kosti vřetenní. Jelikož bod *stylion* nebyl snadno identifikovatelný ve virtuálním prostředí zvolili jsme vzdálenost bodů *radiale* a *supracarpale ulnare* jako alternativu, ve které byla nejsnazší identifikace potřebných bodů. Šířka segmentu horní končetiny byla stanovena jako biepiekondylární šířka paže (M 52(3)). Dále model vyžadoval bikristální šířku pánve (M 40), délku kosti stehenní získanou jako projekční míru pomocí vzdálenosti bodů *iliospinale anterius* od země (M 13) a *tibiale externum* od země, od které bylo odečteno 7 % z výsledné délky. Distální šířka segmentu stehna a šířka segmentu bérce byla dána vzdáleností *merion laterale* od *merion mediale* (M 59d). Výška bérce byla dána jako projekční míra vzdáleností bodu *tibiale externum* od země a *supratarsale tibiale* od země. Pro stanovení hmotnosti z modelu Kasabova byla hodnota odhadovaného objemu vynásobena 1,1 g/cm³. Jelikož model Kasabova zanedbává segmenty hlavy, krku, rukou a nohou, jejichž hmotnost odpovídá 11,2 % celkové hmotnosti, byly tyto segmenty dopočítány, abychom dostali celkovou hmotnost těla. Shrnutí lineárních rozměrů a obvodových měr použitých jednotlivými modely je v tabulce 2.

3.4 Chyba měření

K posouzení přesnosti měření byl vypočten chybový variační koeficient (V_{ch} ; Šmahel, 2001) dle vzorce:

$$V_{ch} = \frac{S_{ch}}{\bar{X}} 100 \quad (34)$$

kde S_{ch} je chybová směrodatná odchylka a \bar{X} je průměr hodnoceného znaku. Chybový variační koeficient je mírou přesnosti měření znaku a nesmí překročit hodnotu 5 %, lépe však 3 % (Šmahel, 2001).

Chybová směrodatná odchylka (S_{ch} ; Šmahel, 2001) je vypočítána dle vzorce:

$$S_{ch} = \sqrt{\frac{\sum (x_1 - x_2)^2}{2n}}, \quad (35)$$

ve kterém x_1 značí první měření, x_2 je druhé měření a n je počet jedinců. Pro všechny námi měřené rozměry byl chybový variační koeficient menší než 3 %.

3.5 Statistická analýza

Statistická analýza byla provedena v programech Microsoft Excel (ver. 16.36, Microsoft 365, Microsoft Corporation, 2020) a Past (ver. 4.01, Hammer, 1999–2020). Ke stanovení spolehlivosti modelů byly odhadované hodnoty povrchu, objemu a hmotnosti těla i povrchu a objemu tělesných segmentů srovnány s odpovídajícími hodnotami získanými přímým měřením v programu 3D Measure Up. V programu Microsoft Excel jsme stanovili průměrnou procentuální absolutní odchylku ($MAD\%$; Sládek et al., 2010) odhadu povrchu, objemu a hmotnosti těla jednotlivými modely a povrchu a objemu tělesných segmentů námi vytvořeného modelu dle vzorce:

$$MAD\% = \frac{\sum_{i=1}^n [|OH_i - MH_i| / MH_i] \cdot 100}{n}, \quad (36)$$

kde OH značí odhadovanou hodnotu povrchu, objemu či hmotnosti těla či povrchu nebo objemu segmentu, MH značí měřenou hodnotu odpovídajícího povrchu, objemu či hmotnosti těla či povrchu nebo objemu segmentu a n značí počet probandů. Model byl definován jako spolehlivý, pokud průměrná procentuální absolutní odchylka byla méně než 5 % (Sládek et al., 2010). Rovněž jsme stanovili průměrnou procentuální odchylku ($MD\%$; Sládek et al., 2010) povrchů těla, objemů těla a tělesných hmotností odhadovaných jednotlivými modely stejně tak jako jednotlivých segmentů dle vzorce:

$$MD\% = \frac{\sum_{i=1}^n [(OH_i - MH_i) / MH_i] \cdot 100}{n}. \quad (37)$$

Jelikož odhadované hodnoty i hodnoty získané přímým měřením byly zatíženy chybou použili jsme RMA regresní analýzu v programu Past. RMA regresní analýza je vhodná v situacích, kdy jsou proměnné na obou osách zatíženy chybou a není tedy vhodné využít metodu nejmenších čtverců (Kasabova & Holliday, 2015). Kromě rovnice přímky a konfidenčních intervalů parametrů rovnice přímky, jsme získali také koeficient korelace (r), který vyjadřuje míru korelace, a koeficient determinace (R^2), který udává, do jaké míry vysvětlující proměnná vysvětluje vysvětlovanou proměnnou (Nagelkerke, 1991), či podíl celkového rozptylu závislé proměnné vysvětlené regresní rovnicí (Glantz et al., 2016).

4 Výsledky

4.1 Odhad povrchu těla

Průměrná procentuální absolutní odchylka všech modelů je zobrazena na grafu 1. Nejspolehlivějším modelem pro odhad povrchu těla, a tedy modelem s nejmenší průměrnou procentuální absolutní odchylkou je model Cross s hodnotou 1,2 % následovaný námi vytvořeným modelem kvádr s hodnotou 2,8 %. Za spolehlivé dále můžeme označit modely

válec, Ruff a DuBois, jelikož jejich průměrná procentuální absolutní odchylka byla menší než 5 %. Průměrná procentuální odchylka odhadu povrchu těla je zobrazena na grafu 2. Průměrná procentuální odchylka představuje směrové zkreslení a dosahuje kladných i záporných hodnot. Pomocí průměrné procentuální odchylky tedy známe odchylku odhadovaného povrchu těla od měřeného povrchu těla, a také zda daný model nadhodnocuje či podhodnocuje ve svém odhadu. Nejmenší průměrnou procentuální odchylku má model Cross a to 0,3 %. Průměrná procentuální odchylka modelu kvádr je rovna -1,8 % a je tak druhou nejmenší průměrnou procentuální odchylkou. Průměrná procentuální odchylka modelu válec rovna -3,6 %. Průměrná procentuální odchylka modelu elipsa je -10,2 %, což ukazuje že tento model podhodnocuje velikost povrchu těla. Model DuBois má průměrnou procentuální odchylku 3,6 % a model Ruff 2,9 %. Průměrná procentuální odchylka modelu Kasabova je -22,4 %.

Srovnání měřeného povrchu těla s odhadovaným povrchem těla pomocí jednotlivých modelů je zobrazeno v grafu 3. Regresní přímka pro každý model je dána rovnicí získanou RMA regresní analýzou. Na grafu jsou vyznačeny hodnoty porovnání měřeného a odhadovaného povrchu těla a jejich rozptyl. Na grafu 3 je rovněž uveden koeficient determinace daný porovnáním měřeného a odhadovaného povrchu těla. Tímto srovnáním jsme získali rovněž koeficient korelace, který udává sílu vztahu mezi proměnnými. Koeficient determinace udává procentuální shodu modelu s daty. Koeficient korelace a koeficient determinace povrchu těla jednotlivých modelů jsou zobrazeny v tabulce 3. Nejvyšší hodnotu koeficientu korelace a koeficientu determinace má model DuBois s koeficientem korelace $r = 1,00$ a koeficientem determinace $R^2 = 0,99$. Druhou nejvyšší shodu modelu s daty má model Cross a to 98 %, s koeficientem korelace $r = 0,99$ a koeficientem determinace $R^2 = 0,98$. Shoda všech variant našeho modelu s daty je vyšší než 91 %, kde nejvyšší je pro variantu model kvádr, který má koeficient korelace $r = 0,96$ a koeficient determinace $R^2 = 0,93$ a má tedy shodu modelu s daty 93 %. Zbylé modely mají koeficient korelace vyšší než 0,93 a koeficient determinace vyšší než 0,87.

Srovnání měřeného povrchu těla se všemi odhadnutými povrchy těla je na grafu 4. Na tomto grafu lze vidět polohu regresních přímek jednotlivých modelů vzhledem k isometrické přímce, kterou lze považovat za pomyslný ideální model. Isometrická přímka má sklon odpovídající směrnici přímky s hodnotou jedna a protíná osu y v bodě nula. Hodnoty sklonu regresní přímky dané směrnici přímky a konfidenční intervaly jsou vyobrazeny na grafu 5A. Sklon regresní přímky roven jedné ukazuje, že poměr odhadovaných a měřených hodnot je isometrický, a tedy že s rostoucím měřeným povrchem těla model nemá tendenci

nadhodnocovat či podhodnocovat odhad povrchu těla. Sklon regresní přímky nejbližší hodnotě jedna má model Cross s 1,00. Druhým nejbližším modelem je námi vytvořený model kvádr s 0,99. Sklon regresní přímky modelu válec je 0,97 a sklon regresní přímky modelu elipsa je 0,89. Sklon regresní přímky zbylých modelů je od 0,75 do 1,13. Hodnoty průsečíků regresních přímek s osou y jsou zobrazeny na grafu 5B. Průsečík regresní přímky s osou y ukazuje jak je regresní přímka posunuta vzhledem k ose y. Průsečík regresní přímky s osou y roven nule ukazuje, že regresní přímka prochází počátkem, což v kombinaci se sklonem regresní přímky udává zda odhad povrchu těla není nadhodnocen či podhodnocen. Regresní přímka modelu elipsa protíná osu y nejbližší hodnotě nula a to v hodnotě 0,007. Druhým nejlepším modelem je model válec s průsečíkem regresní přímky s osou y v hodnotě -0,011. Následuje model Cross s hodnotou průsečíku regresní přímky s osou y rovnou 0,012. Regresní přímka modelu kvádr protíná osu y v bodě -0,013. Regresní přímky zbylých modelů protínají osu y v rozmezí hodnot od -0,20 do 0,04.

4.2 Odhad objemu těla

Nejnižší průměrnou procentuální absolutní odchylku má model kvádr a to 5,43 %, který je zároveň jediným modelem blížícím se k hodnotě 5 %. Průměrná procentuální absolutní odchylka pro všechny modely odhadu objemu těla je zobrazena na grafu 6. Průměrná procentuální odchylka odhadu objemu těla je zobrazena na grafu 7. Průměrná procentuální odchylka je nejmenší pro model kvádr s hodnotou 0,98 % následovaným modelem Kasabova s -12,11 %. Průměrná procentuální odchylka modelu elipsa má hodnotu -12,25 % a průměrná procentuální odchylka modelu válec je 13,70 %. Model Ruff a model Cross mají vyšší průměrnou procentuální odchylku než 17,03 %.

Měřený objem těla srovnaný s odhadovaným objemem těla pomocí jednotlivých modelů je zobrazen na grafu 8. Regresní přímka pro každý model je dána rovnicí získanou RMA regresní analýzou. Na grafu jsou vyznačeny hodnoty porovnání měřeného a odhadovaného objemu těla a rozptyl těchto hodnot. Na grafu 8 je rovněž vyznačen koeficient determinace. Tabulka 3 zobrazuje koeficient korelace i koeficient determinace odhadu objemu těla jednotlivými modely. Model Cross má koeficient korelace $r = 0,99$ a koeficient determinace $R^2 = 0,98$. Model Kasabova má koeficient korelace $r = 0,95$ a koeficient determinace $R^2 = 0,91$ a shoda modelu s daty je druhá nejvyšší, konkrétně 91 %. Shoda všech variant našeho modelu s daty je vyšší než 89 %, kde nejvyšší je pro variantu model kvádr. Koeficient korelace v tomto případě je $r = 0,95$ a koeficient determinace $R^2 = 0,90$. Nejmenší shodu modelu s daty má model Ruff a to 84 %.

Srovnání měřeného objemu těla se všemi odhadnutými objemy těla je na grafu 9. Graf 9 zobrazuje vzájemnou polohu regresních přímek jednotlivých modelů a isometrické přímky. Hodnoty sklonu regresní přímky dány směrnici přímky a konfidenční intervaly jsou vyobrazeny na grafu 10A. Sklon regresní přímky nejbližší hodnotě jedna má model kvádr s 1,00, který se jeví jako isometrický. Druhým nejbližším modelem k hodnotě 1, která ukazuje isometrii, je model Cross s 1,11 a třetím je model válec s 1,12. Regresní přímka modelu elipsa má sklon 0,85. Model Ruff má sklon regresní přímky 1,94 a sklon regresní přímky modelu Kasabova je 0,82. Hodnoty průsečíků regresní přímky s osou y jsou na grafu 10B včetně konfidenčních intervalů. Regresní přímka modelu kvádr protíná osu y nejbližší hodnotě nula a to v hodnotě 0,57. Druhým nejlepším modelem je model válec s hodnotou 1,36. Průsečík s osou y regresní přímky modelu elipsa se nachází v hodnotě 1,84. Zbylé modely mají hodnoty průsečíku s osou y vzdálenější od hodnoty nula než dříve zmíněné modely, a to v rozmezí od -9,18 do 4,83.

4.3 Odhad hmotnosti těla

Průměrná procentuální absolutní odchylka žádného z modelů nebyla menší než 5 %. Nejvíce se k této hodnotě přiblížil model válec, jehož průměrná procentuální absolutní odchylka je 6,82 %. Průměrná procentuální absolutní odchylka všech modelů je zobrazena na grafu 11. Průměrná procentuální odchylka odhadu hmotnosti je zobrazena na grafu 12. Průměrná procentuální odchylka je nejmenší pro model elipsa s -5,33 % následovaná modelem kvádr s 8,94 %. Průměrná procentuální odchylka modelu Kasabova je 10,82 % a průměrná procentuální odchylka modelu válec je 22,68 %.

Měřená hmotnost těla srovnaná s odhadovanou hmotností těla pomocí modelů elipsa, kvádr, válec a Kasabova je zobrazena na grafu 13. Pro další modely nebyla hmotnost odhadována, jelikož autoři své modely za tímto účelem nevytvořili a není tedy známá hodnota hustoty těla, kterou pro daný model použít. Graf 13 zobrazuje regresní přímky dané RMA regresní analýzou pro každý model a jsou vyznačeny hodnoty porovnání měřené a odhadované hmotnosti těla a jejich rozptyl. Je zde rovněž vyznačen koeficient determinace daný srovnáním měřené a odhadované tělesné hmotnosti. Koeficient korelace daný také srovnáním měřené a odhadované tělesné hmotnosti je spolu s koeficientem determinace zobrazen v tabulce 3. Modely Kasabova, elipsa a kvádr mají koeficient korelace $r=0,94$ a koeficient determinace $R^2=0,89$ a mají tak shodu modelu s daty 89 %. Model válec má koeficient korelace $r=0,93$ a koeficient determinace $R^2=0,87$.

Srovnání měřené hmotnosti těla se všemi odhadovanými hmotnostmi těla je na grafu 14. Na tomto grafu lze vidět polohu regresních přímek jednotlivých modelů vzhledem

k isometrické přímce. Isometrická přímka má směrnici přímky s hodnotou jedna a protíná osu y v bodě nula.

Hodnoty sklonu regresní přímky dané směrnici přímky a konfidenčními intervaly jsou vyobrazeny na grafu 15A. Sklon regresní přímky nejbližší hodnotě jedna má model Kasabova s 1,02. Druhým nejbližším modelem je model kvádr s 1,06. Model elipsa má sklon regresní přímky 0,92 a sklon regresní přímky modelu válec je 1,19. Hodnoty průsečíků regresní přímky s osou y jsou na grafu 15B včetně konfidenčních intervalů. Regresní přímka modelu kvádr protíná osu y nejbližší hodnotě nula a to v hodnotě 1,62. Druhým nejlepším modelem je model válec s hodnotou 2,58. Ostatní modely protínají osu y v rozmezí od 2,82 do 6,22.

4.4 Odhad povrchu segmentů

Nejmenší průměrnou procentuální absolutní odchylku má segment bérce 5,55 % a trup válec 5,72 %. Hodnoty průměrné procentuální absolutní odchylky pro odhad povrchu všech segmentů jsou na grafu 16. Průměrná procentuální odchylka odhadu povrchu segmentů je zobrazena na grafu 17. Nejmenší průměrnou procentuální odchylku má odhad povrchu segmentu bérce a to -1,32 %. Druhou nejmenší průměrnou procentuální odchylku má odhad povrchu segmentu trup válec s 4,72 % a následují odhady segmentu nohy s -5,45 %, paže s -5,46 % a stehna s 5,54 %.

Srovnání měřeného povrchu segmentů a odhadovaného povrchu segmentů je pro každý ze segmentů našeho modelu zobrazeno na grafu 18 pomocí regresní přímky dané RMA regresní analýzou. Na grafu 18 jsou vyznačeny hodnoty srovnání měřeného a odhadovaného povrchu každého segmentu a rozptyl těchto hodnot spolu s koeficientem determinace. Koeficienty determinace a koeficienty korelace odhadu povrchu každého segmentu jsou v tabulce 4. Nejvyšší hodnotu koeficientu korelace má odhad povrchu trupu kvádr a to 0,94. Odhad povrchu trupu kvádr má koeficient determinace 0,89. Silnou korelaci mají odhady povrchu segmentů trup elipsa, trup válec, předloktí, bérce a noha, jež mají koeficient korelace větší než 0,91 a koeficient determinace vyšší než 0,83.

Hodnoty sklonu regresních přímek jsou zobrazeny na grafu 19A. Směrnici regresní přímky nejbližší hodnotě jedna má trup válec s hodnotou 1,04 a je následován segmentem předloktí s hodnotou 1,06. Blízko k hodnotě jedna směrnice regresní přímky mají i segment nohy s hodnotou 1,07 a segment trup kvádr s hodnotou 1,08. Průsečík regresních přímek s osou y je zobrazen na grafu 19B. Průsečík regresní přímky a osy y trupu válec je 18,78, což činí tento segment nejbližší hodnotě nula. Druhým nejbližším segmentem je segment krk,

který má průsečík regresní přímky s osou y v hodnotě $-19,36$. Procento, jakým se jednotlivé povrchy odhadovaných segmentů podílí na celkovém povrchu těla, je zobrazeno v tabulce 5.

4.5 Odhad objemu segmentů

Segment hlavy má průměrnou procentuální absolutní odchylku $7,57\%$ a trup kvádr $7,65\%$ a dosahují tak nejnižších hodnot průměrné procentuální absolutní odchylky v rámci odhadu objemu segmentů. Průměrná procentuální absolutní odchylka všech segmentů je na grafu 20. Nejmenší průměrnou procentuální odchylku má odhad objemu segmentu hlavy a to $-0,39\%$. Průměrná procentuální odchylka odhadu objemu bérce je $-3,13\%$, a tento segment má tak druhou nejmenší průměrnou procentuální odchylku odhadu objemu. Menší než 5% průměrnou procentuální odchylku má odhad objemu segmentu předloktí s $-3,21\%$ a odhad objemu segmentu trupu kvádr s $4,07\%$. Průměrná procentuální odchylka odhadu objemu všech segmentů je na grafu 21.

Na grafu 22 je zobrazeno srovnání měřeného objemu segmentů a odhadovaného objemu segmentů našeho modelu. Regresní přímky dané RMA regresní analýzou jsou zobrazeny spolu s hodnotami srovnání měřeného a odhadovaného objemu každého segmentu, jejich rozptylem a koeficientem determinace. Koeficienty determinace a koeficienty korelace odhadu objemu tělesných segmentů jsou v tabulce 4. Odhady objemů všech segmentů s výjimkou segmentu stehna mají koeficient korelace vyšší než $0,80$ a všechny varianty segmentu trupu mají koeficient korelace vyšší než $0,94$. Nejvyšší koeficient korelace mají odhady objemu segmentů trup elipsa a trup kvádr s hodnotou $0,95$ a koeficientem determinace $0,90$.

Sklon regresní přímky daný směrnici přímky pro každý ze segmentů je znázorněn na grafu 23A. Sklon regresní přímky odhadu objemu segmentu předloktí je $0,98$, což je nejbližší hodnotě jedna, která odpovídá isometrické přímce. Sklon regresní přímky pro model trupu kvádr je $1,05$, což je druhá nejbližší hodnota hodnotě jedna. Průsečík regresních přímek s osou y je zobrazen na grafu 23B. Průsečík regresních přímek s osou y mají nejbližší hodnotě nula segmenty předloktí s průsečíkem v hodnotě $-14,30$, krk s průsečíkem regresní přímky s osou y v hodnotě $-20,63$ a noha s průsečíkem osy y v hodnotě $-68,67$. Procento, jakým se jednotlivé segmenty podílejí na celkovém objemu těla, je v tabulce 6.

5 Diskuze

5.1 Odhad povrchu, objemu a hmotnosti těla

Z námi vytvořených variant modelu je pro odhad povrchu těla i objemu těla nejlepší model kvádr. Model kvádr má z našich modelů nejmenší průměrnou procentuální absolutní odchylku a průměrnou procentuální odchylku při odhadu povrchu i objemu těla. Při odhadu povrchu těla je tento model spolehlivý, jelikož průměrná procentuální absolutní odchylka je menší než akceptovaná hodnota 5 %. Při odhadu objemu těla má model kvádr hodnotu průměrné procentuální absolutní odchylky 5,43 % a je tak blízko hodnotě 5 %. Model kvádr má také nejlepší shodu modelu s daty danou koeficientem determinace. Tento model má sklon regresní přímky i průsečík regresní přímky s osou y v hodnotách, které ukazují, že daný model nenadhodnocuje ani nepodhodnocuje odhad povrchu či objemu v žádném úseku. Při odhadu hmotnosti má model kvádr z našich modelů nejbližší sklon regresní přímky hodnotě jedna a průsečík regresní přímky s osou y nejbližší hodnotě nula.

Ze zbylých dvou modelů je ve většině ukazatelů vhodnější model válec, který odhaduje povrch těla s menší průměrnou procentuální absolutní odchylkou, průměrnou procentuální odchylkou a má lepší hodnoty sklonu regresní přímky pro odhad povrchu těla i objemu těla. Průsečík regresní přímky modelu válec s osou y dosahuje lepší hodnoty pouze u odhadu objemu těla, ačkoli u odhadu povrchu je rozdíl oproti modelu elipsa nepatrný. Model elipsa má lepší shodu modelu s daty v případě odhadu povrchu těla i objemu těla a má menší průměrnou procentuální odchylku při odhadu objemu těla ve srovnání s modelem válec. Průměrná procentuální odchylka při odhadu hmotnosti je nejmenší pro model elipsa.

5.2 Srovnání odhadu povrchu, objemu a hmotnosti těla s dalšími modely

Při srovnání s již existujícími modely musíme vzít v úvahu více faktorů než jen parametry regresní rovnice, koeficienty korelace a determinace, průměrnou procentuální absolutní odchylku či průměrnou procentuální odchylku. Model DuBois (DuBois & DuBois, 1916) a model Ruff (Ruff, 1991) neuvažují rozdělení těla na segmenty a není tedy možné pozorovat vliv tělesných proporcí na povrch či objem těla. Právě změna délky končetin vzhledem k trupu však může mít z hlediska termoregulace vliv, jelikož by došlo ke změně poměru povrchu těla k tělesnému objemu. Změny proporcí těla můžeme sledovat, jak v současné lidské populaci v závislosti na klimatické zóně, tak i v rámci evoluční historie člověka. Spolehlivost těchto dvou modelů by tedy měla být s ohledem na problematiku proměnlivosti tělesných proporcí testována na vysoce variabilním vzorku. V rámci našeho souboru má model DuBois nejlepší shodu modelu s daty při odhadu povrchu těla. Model

DuBois i model Ruff mají při odhadu povrchu těla průměrnou procentuální absolutní odchylku i průměrnou procentuální odchylku do 5 %.

Námi vytvořený multisegmentový model, stejně jako model Cross (Cross et al., 2008) či model Kasabova (Kasabova & Holliday, 2015), rozděluje tělo na více segmentů, což umožňuje sledovat efekt, jaký mají měnící se proporce končetin na odhad povrchu a objemu těla. Model Kasabova však uvažuje volnou horní končetinu bez ruky jako jeden segment a není tedy možné sledovat poměr předloktí k trupu, což se například u neandertálců uvažuje z hlediska termoregulace za podstatné (Holliday, 1997; Trinkaus, 1981). Kromě toho tento model vyžaduje další úpravy například pomocí regresní rovnice či přičítáním segmentů, které nejsou v modelu původně zahrnuty. Odhad hmotnosti modelu Kasabova byl umožněn díky vynásobením odhadu objemu hustotou $1,1 \text{ g/cm}^3$ a přičtením hmotnosti chybějících segmentů (danou procenty celkové hmotnosti). Tyto úpravy sice zlepšují spolehlivost tohoto modelu, jeho použití se tím však komplikuje. Model Kasabova má při odhadu hmotnosti sklon regresní přímky nejbližší hodnotě jedna. Koeficient determinace odhadu hmotnosti modelu Kasabova je shodný jako u modelu elipsa a modelu kvádr. Model Cross modeluje již všechny segmenty a i přesto, že jsme kvůli nemožnosti testovat odhad povrchu i objemu segmentu ruky tento segment neuvažovali, dosahoval model vysokého koeficientu determinace. Při odhadu povrchu těla měl model Cross nejmenší průměrnou procentuální absolutní odchylku, průměrnou procentuální odchylku a nejlepší sklon regresní přímky. Jelikož však model Cross pracuje s obvodovými měřeními, je jeho použití na kosterní materiál komplikované.

5.3 Odhad povrchu a objemu segmentů

Odhad povrchu jednotlivých segmentů našeho modelu měl průměrnou procentuální absolutní odchylku menší než 10 % u segmentů trup kvádr, trup válec, předloktí, stehno, bérce a noha, s tím že nejbližší k 5 % se přiblížil segment bérce a trup válec. Průměrnou procentuální odchylku u odhadu povrchu segmentů menší než 5 % měli segmenty bérce a trup válec. Trup kvádr, paže, předloktí, stehno a noha měli průměrnou procentuální odchylku odhadu povrchu menší než 10 %, kdy průměrná procentuální odchylka odhadu povrchu segmentů paže, stehno a noha byla blízko k hodnotě 5 %. Největší průměrnou procentuální absolutní odchylku při odhadu povrchu měl segment krk, konkrétně 37 %, což může být způsobeno celkově malým povrchem tohoto segmentu. V případě malého celkového povrchu segmentu se i malý rozdíl mezi měřeným povrchem a odhadovaným povrchem projeví jako výrazná procentuální odchylka. Segment krk tvoří méně než jedno procento celkového povrchu těla, a tak se v rámci odhadu celkového povrchu těla projeví maximálně z 0,35 %.

Odhad objemu jednotlivých segmentů našeho modelu měl průměrnou procentuální absolutní odchylku menší než 10 % u segmentů hlava, trup kvádr a předloktí. Průměrnou procentuální odchylku odhadu objemu segmentů menší než 5 % měli segmenty hlava, trup kvádr, předloktí a bérce. Největší průměrnou procentuální absolutní odchylku měl při odhadu objemu segmentu trup válec, konkrétně 26 %. Tato výrazná odchylka naznačuje, že válec není nejvhodnější pro odhad objemu segmentu trupu, a díky průměrné procentuální odchylce 26 % víme, že válec v odhadu objemu segmentu trupu výrazně nadhodnocuje. Na obrázku 4I, J, K a L, kde jsou průřezy trupu proloženy obrysem modelu válce, je patrný přesah obrysu válce přes obrys průřezu trupu, a tedy možná příčina nadhodnocení objemu.

Největší povrch i objem má segment trupu a to zhruba 40 % povrchu těla a více než 50 % celkového objemu těla (tabulka 5 a 6). Při odhadu povrchu segmentu trupu má nejmenší průměrnou procentuální absolutní odchylku model válec a při odhadu objemu segmentu trupu model kvádr, a to vždy do 10 %. Průměrnou procentuální absolutní odchylku odhadu povrchu segmentu trupu do 10 % má i model kvádr. Průměrná procentuální odchylka je u odhadu povrchu segmentu trupu modelu válec a odhadu objemu segmentu trupu modelu kvádr do 5 %. Při bližším srovnání modelů pro odhad povrchu segmentu trupu má nejvyšší koeficient determinace model kvádr a sklon regresní přímky nejbližší hodnotě jedna model válec. Pro odhad objemu segmentu trupu máme nejvyšší koeficient determinace u modelů elipsa a kvádr, ale model kvádr má navíc hodnotu sklonu regresní přímky nejbližší jedné.

5.4 Využití multisegmentového modelu pro studium termoregulace

Námi vytvořený multisegmentový model lidského těla by bylo možné využít pro studium termoregulace člověka, jelikož povrch a objem těla a jejich vzájemný poměr jsou důležitými faktory z hlediska termoregulace (Cross & Collard, 2011; Ruff, 1994). Díky možnosti odhadnout povrch a objem jednotlivých segmentů bude možné vytvořit multisegmentový model tepelné výměny. Již existující multisegmentové modely tepelné výměny se používají pro studium termoregulace (Collard & Cross, 2017; Cross et al., 2008; Fiala et al., 1999, 2001; Stolwijk, 1971; Tanabe et al., 2002). Následně by mělo být možné modelovat tepelnou bilanci segmentů těla a vytvořit tak komplexnější pohled na problematiku termoregulace člověka.

Komplexnější model tepelné výměny uvažující vliv jednotlivých segmentů na termoregulaci by mohl být využit například při modelování termoregulačních omezení a nároků dalších homininů než pouze anatomicky moderního člověka (Collard & Cross, 2017). V evoluci homininů docházelo ke změně tělesných proporcí, což bývá dáváno do souvislosti

s adaptací na chladné či horké klima (Churchill, 1998; Ruff, 1991; Trinkaus, 1981). Je tedy překvapivé, že použití multisegmentového modelu Cross při modelování tepelné bilance ukázalo, že rozdílná velikost segmentů končetin u různých druhů homininů nemusí být dána termoregulací (Collard & Cross, 2017). U tohoto modelu však nebyly testovány odhady povrchu a objemu jednotlivých segmentů a je tedy otázkou, zda byl odhad povrchu a objemu jednotlivých segmentů spolehlivý.

Multisegmentový model tepelné výměny taky umožňuje sledovat vnější faktory pro každý segment těla zvlášť (Collard & Cross, 2017; Cross et al., 2008). Vnější faktory nepůsobí na celý povrch těla uniformně (Wheeler, 1991). Míra sluneční radiace, rychlost větru ale třeba i teplota vzduchu mají pro každý segment odlišné hodnoty (Cross et al., 2008; Wheeler, 1991), a tak by modelování tepelné výměny jednotlivých segmentů a testování vlivů, které na ně působí, mohlo ovlivnit výsledky celkové tepelné bilance.

5.5 Limity práce

Pro zvýšení spolehlivosti odhadu povrchu a objemu těla pomocí našeho modelu by bylo vhodné budoucí zvětšení velikosti souboru pozorování, ačkoli již dříve vytvořené modely pracovaly s menšími soubory jedinců (Cross et al., 2008; DuBois & DuBois, 1916) a náš soubor byl z hlediska výšky postavy či tělesné hmotnosti poměrně variabilní. Oproti stávajícím modelům byl námi vytvořený model navíc testován za použití 3D celotělových skenů.

Při aplikaci dřívějších modelů na náš soubor dat mohlo dojít ke zkreslení odhadu povrchu i objemu těla. Model Kasabova byl vyvinut k aplikaci na kosterní materiál (Kasabova & Holliday, 2015) a přítomnost měkkých tkání tedy může zvyšovat chybu měření. V budoucnu by bylo vhodné testovat tento model například za využití CT skenů, které by umožnili i měření rozměrů přímo na kostech daného jedince. Aby všechny modely měly stejné podmínky, testovali jsme navíc tento model bez následných úprav regresními rovnicemi, které by zlepšily odhad povrchu a objemu těla za pomoci modelu Kasabova. Při aplikaci modelu Cross jsme narazili na problematiku získání rozměrů, které autoři použili. Autoři využívají ve svém modelu vícenásobného měření obvodů segmentů, avšak ne vždy přesně definují, které obvodové míry byly měřeny.

V budoucnu by bylo možné využít náš multisegmentový model k odhadu povrchu a objemu těla i na základě kosterního materiálu. V tomto případě by bylo problematické použití obvodu krku pro získání povrchu a objemu tohoto segmentu. Jelikož však tento segment tvoří méně než jedno procento celkového povrchu a objemu těla, nepovažujeme tuto skutečnost za zvlášť problematickou. Více problematickým by mohlo být množství rozměrů, které jsou

nutné pro fungování modelu. Námi vytvořený model vyžaduje 16 rozměrů, což klade poměrně vysoké nároky na stupeň zachovalosti či vytváří potřebu k využití rovnic pro dopočet chybějících rozměrů. Z hlediska množství potřebných rozměrů je tedy vhodnější model DuBois používající výšku postavy a tělesnou hmotnost, model Ruff, který využívá výšku postavy a bikristální šířku pánve (Ruff, 1991), či model Kasabova, který vyžaduje tělesnou výšku a dalších osm měřených rozměrů (Kasabova & Holliday, 2015). Avšak model DuBois a model Ruff nemodelují tělesné segmenty a není tedy možné sledovat jejich vliv na celkový povrch a objem těla a model Kasabova vyžaduje následné dopočítávání některých segmentů, které nemodeluje.

6 Závěr

V rámci diplomové práce byly vytvořeny tři varianty multisegmentového modelu lidského těla pro odhad povrchu, objemu a hmotnosti těla a povrchu a objemu tělesných segmentů. Modelování tělesných segmentů umožňuje sledovat vliv jaký mají proporce končetin na celkový povrch a objem těla. Model byl vytvořen s ohledem na jeho aplikovatelnost na žijící jedince, stejně tak jako na kosterní materiál. Všechny rozměry s výjimkou obvodu krku lze získat jak pomocí antropometrie na živých jedincích, tak i osteometrií z kosterního materiálu. Všechny tři varianty našeho modelu měly shodně modelovány segmenty hlavy, krku, segmenty horní končetiny a segmenty dolní končetiny. V rámci horní končetiny byl modelován segment paže a předloktí a v rámci dolní končetiny byl modelován segment stehna, bérce a nohy. Varianty našeho multisegmentového modelu se tedy vzájemně lišily pouze segmentem trupu, který byl u varianty jedna nazvané model elipsa modelován jako válec s podstavou elipsy, u varianty zvané model kvádr byl trup modelován jako kvádr a u varianty označované jako model válec byl trup modelován jako rotační válec s kruhovou podstavou.

Z námi vytvořených variant modelu je nejlepší model kvádr, který má nejmenší průměrnou procentuální absolutní odchylku, nejmenší průměrnou procentuální odchylku a sklon regresní přímky nejbližše hodnotě jedna při odhadu povrchu i objemu. Průměrná procentuální absolutní odchylka modelu kvádr při odhadu povrchu těla byla menší než 5 %. Všechny varianty našeho modelu měly koeficient determinace při odhadu povrchu více než 0,91 a při odhadu objemu více než 0,89. Při srovnání se stávajícími modely je povrch odhadnut s nejmenší průměrnou procentuální absolutní odchylkou modelem Cross a nejvyšší koeficient determinace má model DuBois. Nejmenší průměrnou procentuální absolutní odchylku při odhadu objemu těla má námi vytvořený model kvádr. Přestože při odhadu

povrchu těla má model Cross menší průměrnou procentuální absolutní odchylku, námi vytvořený multisegmentový model je možné snáze aplikovat na kosterní materiál jakožto i na živé jedince. Dalšími výhodami našeho modelu je, že modeluje všechny segmenty těla, takže není nutné následné dopočítávání chybějících segmentů do celkového povrchu a objemu těla a model tak lze využít k odhadu povrchu i objemu těla s průměrnou procentuální odchylkou menší než 5 %.

Jelikož námi vytvořený model spolehlivě odhaduje povrch i objem těla, bude možné tento model využít při vytváření multisegmentového modelu tepelné výměny. Díky možnosti aplikovat tento model pro odhad povrchu a objemu na kosterní materiál, bude možné využít i multisegmentový model tepelné výměny na fosilní materiál homininů.

7 Použitá literatura

- Allen, J. A. (1877). The influence of physical conditions in the genesis of species. *Radical Review*, 1, 108–140.
- Allen, J. M., Worman, C. O., Light, J. E., & Reed, D. L. (2013). Parasitic lice help to fill in the gaps of early hominid history. In *Primates, Pathogens, and Evolution* (pp. 161–186). Springer New York.
- Antón, S. C. (2003). Natural History of *Homo erectus*. *American Journal of Physical Anthropology*, 122, 126–170.
- Bergmann, C. (1847). Über die Verhältnisse der Wärmeökonomie der Thiere zu ihrer Größe. *Göttingen Studien*, 1, 595–708.
- Best, A., & Kamilar, J. M. (2018). The evolution of eccrine sweat glands in human and nonhuman primates. *Journal of Human Evolution*, 117, 33–43.
- Blackburn, T., & Hawkins, B. (2004). Bergmann's Rule and the mammal fauna of northern North America. *Ecography*, 27, 715–724.
- Bobe, R., & Behrensmeyer, A. K. (2004). The expansion of grassland ecosystems in Africa in relation to mammalian evolution and the origin of the genus *Homo*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 207, 399–420.
- Böhme, M., Spassov, N., Fuss, J., Tröscher, A., Deane, A. S., Prieto, J., Kirscher, U., Lechner, T., & Begun, D. R. (2019). A new Miocene ape and locomotion in the ancestor of great apes and humans. *Nature*, 575, 489–493.
- Bonnefille, R. (1983). Evidence for a cooler and drier climate in the Ethiopian uplands

- towards 2.5 Myr ago. *Nature*, 303(5917), 487–491.
- Bramble, D. M., & Lieberman, D. E. (2004). Endurance running and the evolution of Homo. *Nature*, 432, 345–352.
- Carrier, D. R., Kapoor, A. K., Kimura, T., Nickels, M. K., Scott, E. C., So, J. K., & Trinkaus, E. (1984). The Energetic Paradox of Human Running and Hominid Evolution [and Comments and Reply]. *Current Anthropology*, 25, 483–495.
- Cavalli-Sforza, L. L. (1986). African Pygmies. In *African Pygmies*. Academic Press.
- Collard, M., & Cross, A. (2017). Thermoregulation in Homo erectus and the Neanderthals: A reassessment using a segmented model. In Marom A., Hovers E. (eds) *Human Paleontology and Prehistory. Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology* (pp. 161–174). Springer, Cham.
- Cross, A., & Collard, M. (2011). Estimating Surface Area in Early Hominins. *PLoS ONE*, 6, e16107.
- Cross, A., Collard, M., & Nelson, A. (2008). Body Segment Differences in Surface Area, Skin Temperature and 3D Displacement and the Estimation of Heat Balance during Locomotion in Hominins. *PLoS ONE*, 3, e2464.
- DeMenocal, P. B. (1995). Plio-Pleistocene African climate. *Science*, 270, 53–59.
- Diamond, J. M. (1991). Why are pygmies small? *Nature*, 354, 111–112.
- Dill, D. B., Edwards, H. T., & Talbott, J. H. (1932). Studies in muscular activity: VII. Factors limiting the capacity for work. *The Journal of Physiology*, 77(1), 49–62.
- DuBois, D., & DuBois, E. F. (1915). Fifth Paper the Measurement of the Surface Area of Man. *Archives of Internal Medicine*, 15, 868–881.
- DuBois, D., & DuBois, E. F. (1916). Clinical calorimetry: Tenth paper a formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Archives of Internal Medicine*, 17, 863–871.
- Elton, S. (2008). The environmental context of human evolutionary history in Eurasia and Africa. *Journal of Anatomy*, 212, 377–393.
- Fetter, V., Prokopec, M., Suchý, J., & Titlbachová, S. (1967). *Antropologie*. Academia.
- Fiala, D., Lomas, K. J., & Stohrer, M. (1999). A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system. *Journal of Applied*

- Physiology*, 87(5), 1957–1972. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.5.1957>
- Fiala, D., Lomas, K. J., & Stohrer, M. (2001). Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology*, 45(3), 143–159.
- Gehan, E. A., & George, S. L. (1970). Estimation of human body surface area from height and weight. *Cancer Chemotherapy Reports. Part 1*, 54, 225–235.
- Glantz, S. A., Slinker, B. K., & Neilands, T. B. (2016). The First Step: Understanding Simple Linear Regression. In K. Schell & R. Pancotti (Eds.), *Primer of Applied Regression and Analysis of Variance* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
- Gordon, C. C., Churchill, T., Clauser, C. E., Bradtmiller, B., McConville, J. T., Tebbetts, I., & Walker, R. A. (1989). *1988 Anthropometric Survey of U.S. Army Personnel: Summary Statistics Interim Report*. Anthropology Research Project, Inc., Massachusetts.
- Hartwig-Scherer, S., & Martin, R. D. (1991). Was “Lucy” more human than her “child”? Observations on early hominid postcranial skeletons. *Journal of Human Evolution*, 21, 439–449.
- Haycock, G. B., Schwartz, G. J., & Wisotsky, D. H. (1978). Geometric method for measuring body surface area: A height-weight formula validated in infants, children, and adults. *The Journal of Pediatrics*, 93, 62–66.
- Higgins, R. W., & Ruff, C. B. (2011). The effects of distal limb segment shortening on locomotor efficiency in sloped terrain: Implications for Neandertal locomotor behavior. *American Journal of Physical Anthropology*, 146, 336–345.
- Hill, A., Ward, S., Deino, A., Curtis, G., & Drake, R. (1992). Earliest Homo. *Nature*, 355, 719–722.
- Holliday, T. W. (1997). Postcranial evidence of cold adaptation in European Neandertals. *American Journal of Physical Anthropology*, 104, 245–258.
- Holliday, T. W., & Ruff, C. B. (2001). Relative variation in human proximal and distal limb segment lengths. *American Journal of Physical Anthropology*, 116, 26–33.
- Hora, M., Pontzer, H., Wall-Scheffler, C. M., & Sládek, V. (2020). Dehydration and persistence hunting in Homo erectus. *Journal of Human Evolution*, 138(102682).
- Hsu, Y.-W., & Yu, C.-Y. (2010). Hand Surface Area Estimation Formula Using 3D

- Anthropometry. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 7, 633–639.
- Churchill, S. E. (1998). Cold adaptation, heterochrony, and neandertals. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 7, 46–60.
- Churchill, S. E. (2014). The Body Neandertal. In *Thin on the Ground: Neanderthal Biology, Archeology and Ecology* (Issue Eisenberg 1990, pp. 71–105). John Wiley & Sons, Inc.
- Jablonski, N. G. (2010). The naked truth. *Scientific American*, 302, 42–49.
- Jungers, W. L. (1982). Lucy's limbs: skeletal allometry and locomotion in *Australopithecus afarensis*. *Nature*, 297, 676–678.
- Jungers, W. L. (1988). Lucy's length: Stature reconstruction in *Australopithecus afarensis* (A.L.288-1) with implications for other small-bodied hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 76, 227–231.
- Kamberov, Y. G., Guhan, S. M., DeMarchis, A., Jiang, J., Sherwood Wright, S., Morgan, B. A., Sabeti, P. C., Tabin, C. J., & Lieberman, D. E. (2018). Comparative evidence for the independent evolution of hair and sweat gland traits in primates. *Journal of Human Evolution*, 125, 99–105.
- Kasabova, B. E., & Holliday, T. W. (2015). New model for estimating the relationship between surface area and volume in the human body using skeletal remains. *American Journal of Physical Anthropology*, 156, 614–624.
- Knussmann, R. (1988). *Anthropologie, Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen* (4. vydání). Gustav Fischer Verlag.
- Kordsmeyer, T. L., Stern, J., & Penke, L. (2019). 3D anthropometric assessment and perception of male body morphology in relation to physical strength. *American Journal of Human Biology*, 31, e23276.
- Krzywicki, H. J., & Chinn, K. S. K. (1967). Human Body Density and Fat of an Adult Male Population as Measured by Water Displacement. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 20, 305–310.
- Lee, J.-Y., Choi, J.-W., & Kim, H. (2007). Determination of Hand Surface Area by Sex and Body Shape using Alginate. *Journal of Physiological Anthropology*, 26, 475–483.
- Levin, N. E., Quade, J., Simpson, S. W., Semaw, S., & Rogers, M. (2004). Isotopic evidence for Plio-Pleistocene environmental change at Gona, Ethiopia. *Earth and Planetary*

- Science Letters*, 219, 93–110.
- Lieberman, D. E. (2015). Human locomotion and heat loss: An evolutionary perspective. *Comprehensive Physiology*, 5, 99–117.
- Lovejoy, C. O., Suwa, G., Simpson, S. W., Matternes, J. H., & White, T. D. (2009). The great divides: *Ardipithecus ramidus* reveals the postcrania of our last common ancestors with African apes. *Science*, 326, 100–106.
- Mayr, E. (1956). Geographical Character Gradients and Climatic Adaptation. *Evolution*, 10, 105–108.
- McHenry, H. M., & Berger, L. R. (1998). Body proportions in *Australopithecus afarensis* and *A. africanus* and the origin of the genus *Homo*. *Journal of Human Evolution*, 35, 1–22.
- Meazza, C., Pagani, S., & Bozzola, M. (2011). The pygmy short stature enigma. *Pediatric Endocrinology Reviews : PER*, 8, 394–399.
- Migliano, A. B., Vinicius, L., & Lahr, M. M. (2007). Life history trade-offs explain the evolution of human pygmies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 20216–20219.
- Montagu, A. (1964). Natural Selection and Man's Relative Hairlessness. *JAMA: The Journal of the American Medical Association*, 187, 356–357.
- Nagelkerke, N. J. D. (1991). A Note on a General Definition of the Coefficient of Determination. *Biometrika*, 78(3), 691–692.
- Newman, R. W. (1970). Why man is such a sweaty and thirsty naked animal: a speculative review. *Human Biology*, 42, 12–27.
- Passey, B. H., Levin, N. E., Cerling, T. E., Brown, F. H., & Eiler, J. M. (2010). High-temperature environments of human evolution in East Africa based on bond ordering in paleosol carbonates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 11245–11249.
- Perry, G. H., & Dominy, N. J. (2009). Evolution of the human pygmy phenotype. *Trends in Ecology and Evolution*, 24, 218–225.
- Porter, A. M. W. (1999). Modern human, early modern human and Neanderthal limb proportions. *International Journal of Osteoarchaeology*, 9, 54–67.
- Reed, D. L., Light, J. E., Allen, J. M., & Kirchman, J. J. (2007). Pair of lice lost or parasites

- regained: the evolutionary history of anthropoid primate lice. *BMC Biology*, 5, 7.
- Roseman, C. C., & Auerbach, B. M. (2015). Ecogeography, genetics, and the evolution of human body form. *Journal of Human Evolution*, 78, 80–90.
- Ruff, C. B. (1991). Climate and body shape in hominid evolution. *Journal of Human Evolution*, 21, 81–105.
- Ruff, C. B. (1993). Climatic adaptation and hominid evolution: The thermoregulatory imperative. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 2, 53–60.
- Ruff, C. B. (1994). Morphological adaptation to climate in modern and fossil hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 37, 65–107.
- Ruff, C. B., Trinkaus, E., & Holliday, T. W. (1997). Body mass and encephalization in Pleistocene Homo. *Nature*, 387, 173–176.
- Ruxton, G. D., & Wilkinson, D. M. (2011). Thermoregulation and endurance running in extinct hominins: Wheeler’s models revisited. *Journal of Human Evolution*, 61, 169–175.
- Schwartz, G. G., & Rosenblum, L. A. (1981). Allometry of primate hair density and the evolution of human hairlessness. *American Journal of Physical Anthropology*, 55, 9–12.
- Simpson, S. W., Levin, N. E., Quade, J., Rogers, M. J., & Semaw, S. (2019). *Ardipithecus ramidus* posterania from the Gona Project area, Afar Regional State, Ethiopia. *Journal of Human Evolution*, 129, 1–45.
- Sládek, V., Berner, M., Galeta, P., Friedl, L., & Kudrnová, Š. (2010). Technical note: The effect of midshaft location on the error ranges of femoral and tibial cross-sectional parameters. *American Journal of Physical Anthropology*, 141, 325–332.
- Stegmann, A. T., Cerny, F. J., & Holliday, T. W. (2002). Neandertal cold adaptation: Physiological and energetic factors. *American Journal of Human Biology*, 14(5), 566–583.
- Steiper, M. E., & Young, N. M. (2006). Primate molecular divergence dates. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 41, 384–394.
- Stewart, J. R. (2007). Neanderthal extinction as part of the faunal change in Europe during Oxygen Isotope Stage 3. *Acta Zoologica Cracoviensia*, 50A, 93–124.
- Stolwijk, J. A. J. (1971). A mathematical model of physiological temperature regulation in

man. *NASA Contractor Reports*.

- Sutou, S. (2012). Hairless mutation: a driving force of humanization from a human-ape common ancestor by enforcing upright walking while holding a baby with both hands. *Genes to Cells*, 17, 264–272.
- Šmahel, Z. (2001). *Principy, teorie a metody auxologie*. Karolinum.
- Tanabe, S. I., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., & Konishi, M. (2002). Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, 34(6), 637–646.
- Tilkens, M. J., Wall-Scheffler, C., Weaver, T. D., & Steudel-Numbers, K. (2007). The effects of body proportions on thermoregulation: an experimental assessment of Allen's rule. *Journal of Human Evolution*, 53, 286–291.
- Trauth, M. H., Maslin, M. A., Deino, A. L., Strecker, M. R., Bergner, A. G. N., & Dühnforth, M. (2007). High- and low-latitude forcing of Plio-Pleistocene East African climate and human evolution. *Journal of Human Evolution*, 53, 475–486.
- Trinkaus, E. (1981). Neanderthal limb proportions and cold adaptation. In *Aspects of human evolution* (pp. 187–224). Taylor and Francis.
- Wheeler, P. E. (1984). The evolution of bipedality and loss of functional body hair in hominids. *Journal of Human Evolution*, 13, 91–98.
- Wheeler, P. E. (1985). The loss of functional body hair in man: the influence of thermal environment, body form and bipedality. *Journal of Human Evolution*, 14, 23–28.
- Wheeler, P. E. (1991). The thermoregulatory advantages of hominid bipedalism in open equatorial environments: the contribution of increased convective heat loss and cutaneous evaporative cooling. *Journal of Human Evolution*, 21, 107–115.
- White, T. D., Lovejoy, C. O., Asfaw, B., Carlson, J. P., & Suwa, G. (2015). Neither chimpanzee nor human, *Ardipithecus* reveals the surprising ancestry of both. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 4877–4884.
- Wynn, J. G. (2004). Influence of Plio-Pleistocene aridification on human evolution: Evidence from paleosols of the Turkana Basin, Kenya. *American Journal of Physical Anthropology*, 123, 106–118.

- Yu, C. Y., Hsu, Y. W., & Chen, C. Y. (2008). Determination of hand surface area as a percentage of body surface area by 3D anthropometry. *Burns*, 34, 1183–1189.
- Yu, C. Y., Lin, C. H., & Yang, Y. H. (2010). Human body surface area database and estimation formula. *Burns*, 36, 616–629.

8 Přílohy

8.1 Tabulky

Tabulka 1. Základní charakteristiky souboru. Uveden je rozsah, průměr a směrodatná odchylka (SD) pro všechny charakteristiky.

	věk	výška (cm)	hmotnost (kg)	BMI (kg/m ²)	měřený povrch těla (m ²)
rozsah	20 – 30	162,2 – 201,2	52,7 – 109,8	16,90 – 32,94	1,49 – 2,41
průměr	24,25	180,83	77,79	23,43	1,91
SD	2,57	9,74	15,21	3,57	0,22

Tabulka 2. Shrnutí rozměrů použitých jednotlivými modely. Symbolem tečky (•) je označeno použití rozměru daným modelem a symbolem pomlčky (—) je označena situace, kdy model tento rozměr nevyužívá.

rozměry	body	elipsa	kvádr	válec	DuBois	Ruff	Cross	Kasabova
hmotnost		—	—	—	•	—	—	—
výška těla (M 1)	(v–země)	•	•	•	•	•	•	•
průměr hlavy (M 1)	(g–op)	•	•	•	—	—	—	—
výška bodu <i>gnathion</i> od země (M 3(1))	(gn–země)	•	•	•	—	—	•	—
výška bodu <i>cervicale</i> od země (M 19)	(c–země)	•	•	•	—	—	•	—
výška paže (M 47)	(a–r)	•	•	•	—	—	•	•
biepikondylární šířka paže (M 52(3))	(hl–hm)	•	•	•	—	—	—	•
výška předloktí	(r–scu)	•	•	•	—	—	•	•
distální průměr předloktí (M 52(4))	(scr–scu)	•	•	•	—	—	—	—
výška bodu <i>iliospinale anterius</i> od země (M 13)	(is–země)	•	•	•	—	—	•	•
výška bodu <i>tibiale externum</i> od země	(tie–země)	•	•	•	—	—	•	•
výška bodu <i>supratarsale tibiale</i> od země	(stt–země)	•	•	•	—	—	•	•
vzdálenost bodu <i>merion laterale</i> a <i>merion mediale</i> (M 59d)	(mel–mem)	•	•	•	—	—	—	•
vzdálenost bodů <i>supratarsale tibiale</i> a <i>supratarsale fibulare</i> (M 59e)	(stt–stf)	•	•	•	—	—	—	—
délka nohy (M 58)	(ap–pte)	•	•	•	—	—	•	—
bikristální šířka pánve (M 40)	(ic–ic)	•	•	•	—	•	—	•
vzdálenost bodů <i>iliospinale anterius</i> a <i>iliospinale posterius</i> (M 43(1))	(is–isp)	•	•	—	—	—	—	—

obvod hlavy	—	—	—	—	—	•	—
obvod krku (M 63)	•	•	•	—	—	•	—
obvod hrudníku v normální poloze (M 61)	—	—	—	—	—	•	—
obvod pasu (M 62)	—	—	—	—	—	•	—
obvod boků (M 64(1))	—	—	—	—	—	•	—
axilární obvod paže	—	—	—	—	—	•	—
obvod paže (M 65)	—	—	—	—	—	•	—
obvod lokte (M 65(3))	—	—	—	—	—	•	—
obvod předloktí maximální (M 66)	—	—	—	—	—	•	—
obvod předloktí minimální (M 67)	—	—	—	—	—	•	—
obvod stehna subgluteální (M 68a)	—	—	—	—	—	•	—
obvod stehna střední (M 68(1))	—	—	—	—	—	•	—
obvod stehna minimální (M 68(2))	—	—	—	—	—	•	—
obvod lýtky maximální (M 69)	—	—	—	—	—	•	—
obvod lýtky minimální (M 70)	—	—	—	—	—	•	—
přední obvod nohy (M *70a)	—	—	—	—	—	•	—

Tabulka 3. Koeficient korelace (r) a koeficient determinace (R^2) odhadu povrchu těla, objemu těla a tělesné hmotnosti jednotlivými modely. Symbolem pomlčky (—) je označena situace, kdy model není využit k odhadu.

model	povrch těla		objem těla		tělesná hmotnost	
	r	R^2	r	R^2	r	R^2
elipsa	0,96	0,92	0,95	0,90	0,94	0,89
kvádr	0,96	0,93	0,95	0,90	0,94	0,89
válec	0,95	0,91	0,94	0,89	0,93	0,87
DuBois	1,00	0,99	—	—	—	—
Ruff	0,93	0,87	0,92	0,84	—	—
Cross	0,99	0,98	0,99	0,98	—	—
Kasabova	0,97	0,94	0,95	0,91	0,94	0,89

Tabulka 4. Koeficient korelace (r) a koeficient determinace (R^2) odhadu povrchu tělesných segmentů a objemu tělesných segmentů.

segment	povrch tělesných segmentů		objem tělesných segmentů	
	r	R^2	r	R^2
hlava	0,75	0,56	0,82	0,68
krk	0,67	0,45	0,88	0,77
trup elipsa	0,94	0,88	0,95	0,90
trup kvádr	0,94	0,89	0,95	0,90
trup válec	0,93	0,86	0,94	0,89
paže	0,77	0,59	0,84	0,71
předloktí	0,93	0,87	0,86	0,75
stehno	0,68	0,47	0,71	0,51
bérec	0,91	0,83	0,83	0,68
noha	0,91	0,83	0,87	0,75

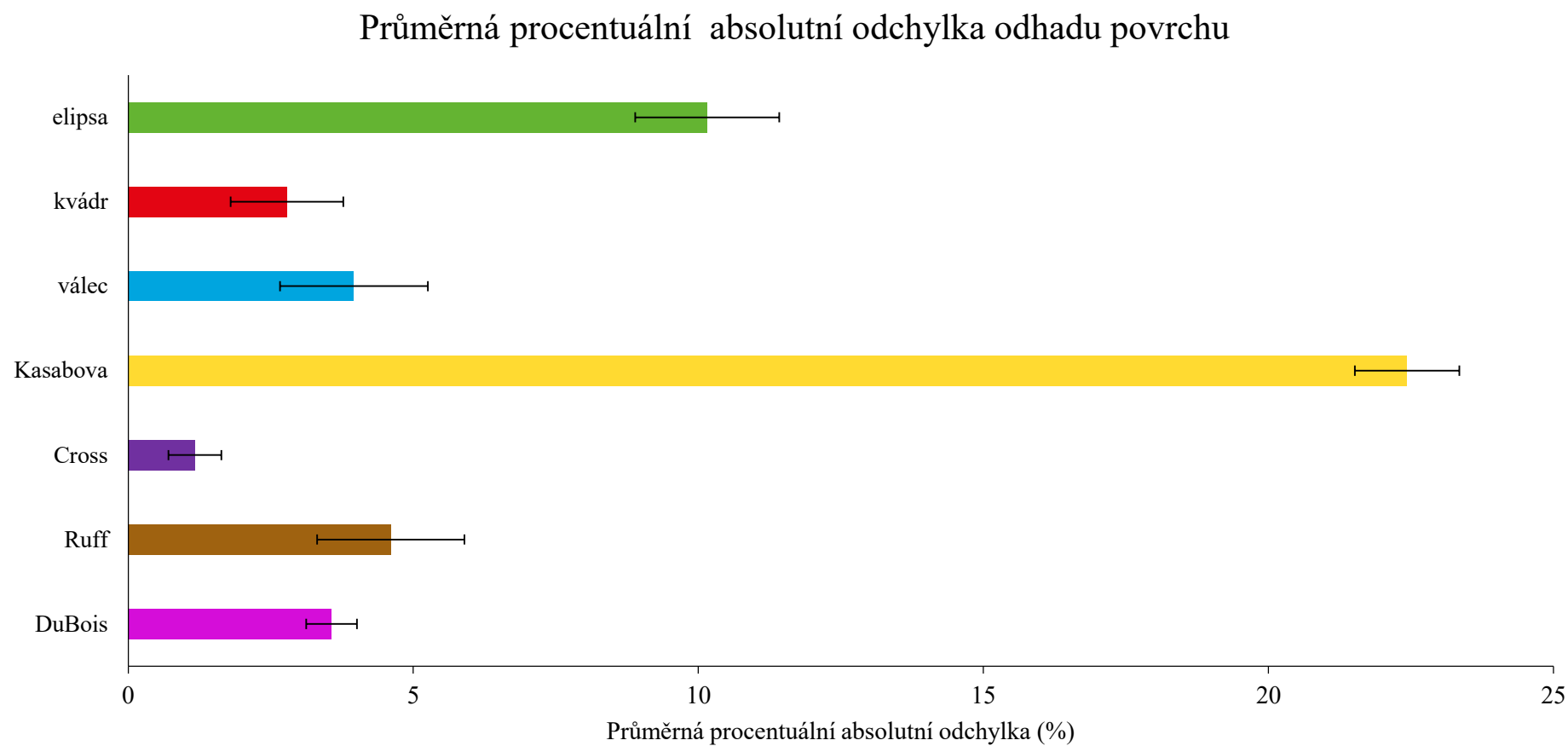
Tabulka 5. Průměrný podíl odhadovaného povrchu jednotlivých segmentů a celkového odhadovaného povrchu těla. Segment trupu odpovídá trupu jednotlivých modelů.

segment	podíl povrchu segmentů na celkovém povrchu		
	model elipsa (%)	model kvádr (%)	model válec (%)
hlava	7,2	6,6	6,8
krk	0,9	0,9	0,9
trup	36,4	41,8	40,7
paže	4,6	4,2	4,3
předloktí	3,2	2,9	3,0
stehno	10,0	9,1	9,3
bérec	6,8	6,2	6,3
noha	3,2	2,9	3,0

Tabulka 6. Průměrný podíl odhadovaného objemu jednotlivých segmentů a celkového odhadovaného objemu těla. Segment trupu odpovídá trupu jednotlivých modelů.

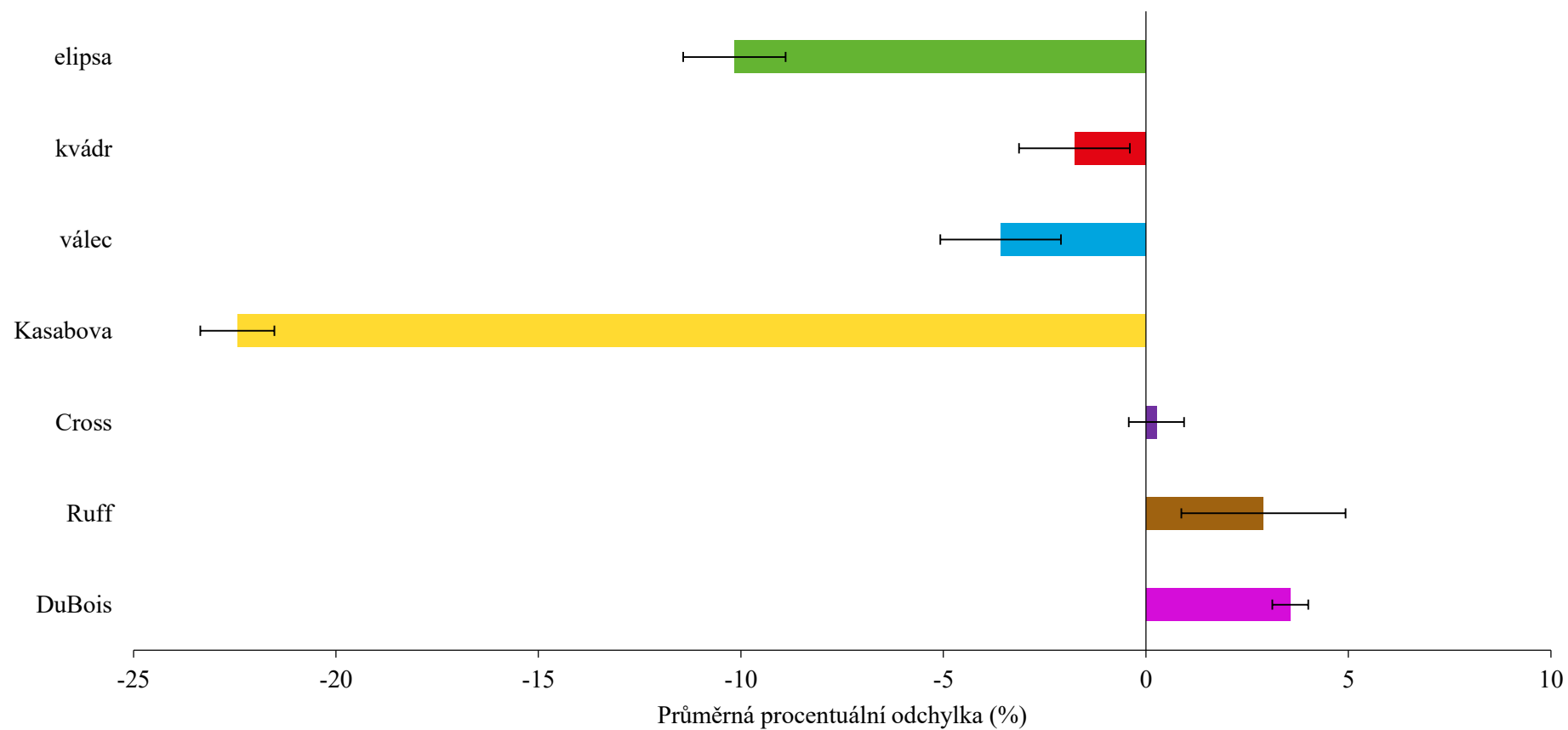
segment	podíl objemu segmentů na celkovém objemu		
	model elipsa (%)	model kvádr (%)	model válec (%)
hlava	6,9	6,0	5,3
krk	0,7	0,6	0,6
trup	55,5	61,3	65,6
paže	2,2	1,9	1,7
předloktí	1,3	1,2	1,0
stehno	9,8	8,5	7,6
bérec	4,1	3,6	3,2
noha	1,0	0,8	0,7

8.2 Grafy

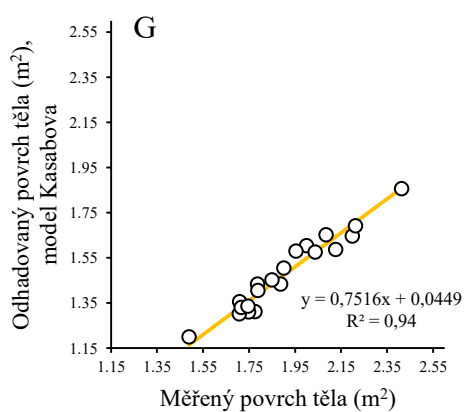
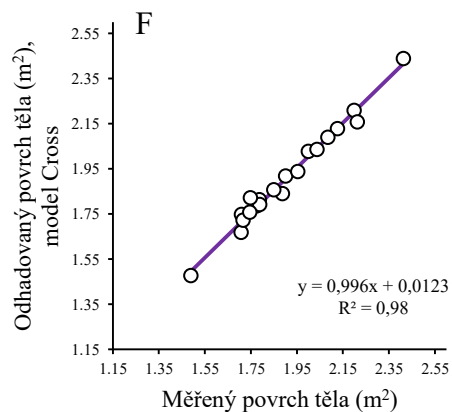
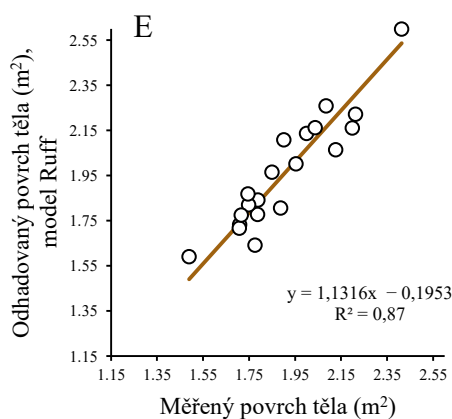
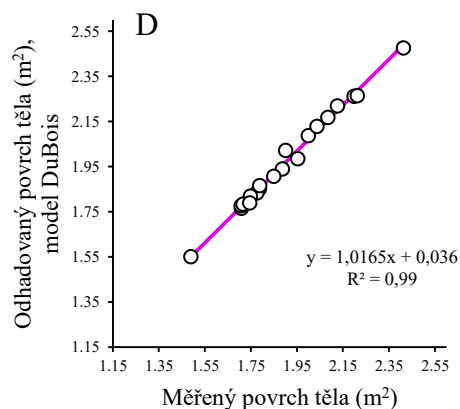
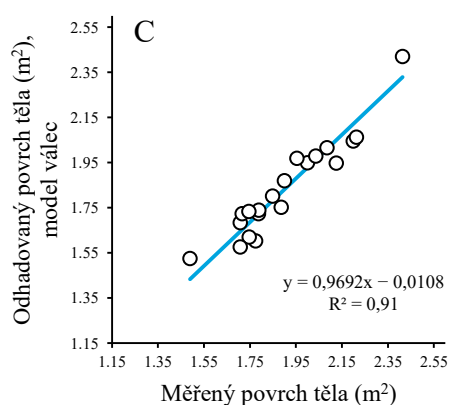
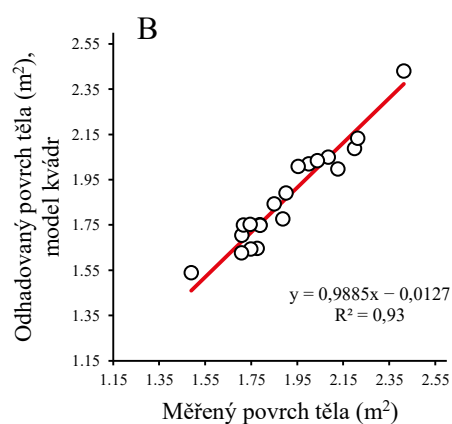
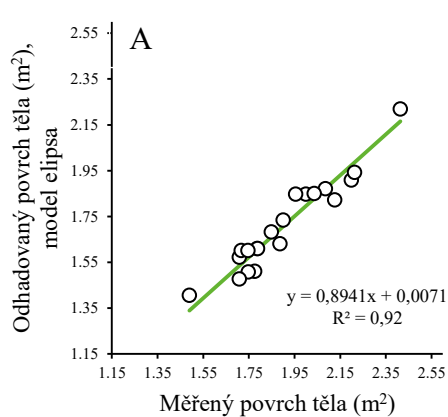


Graf 1. Průměrná procentuální absolutní odchylka odhadu povrchu jednotlivými modely s konfidenčním intervalem s hladinou spolehlivosti 5 %.

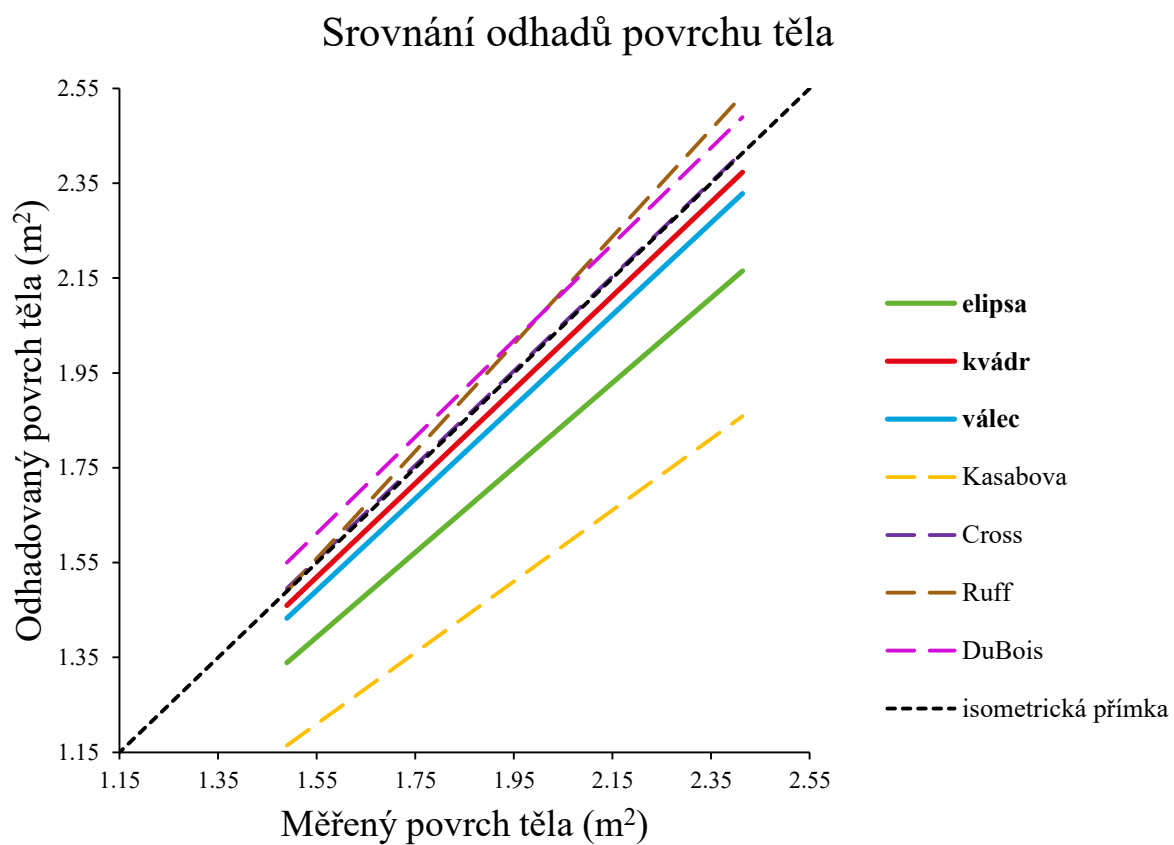
Průměrná procentuální odchylka odhadu povrchu



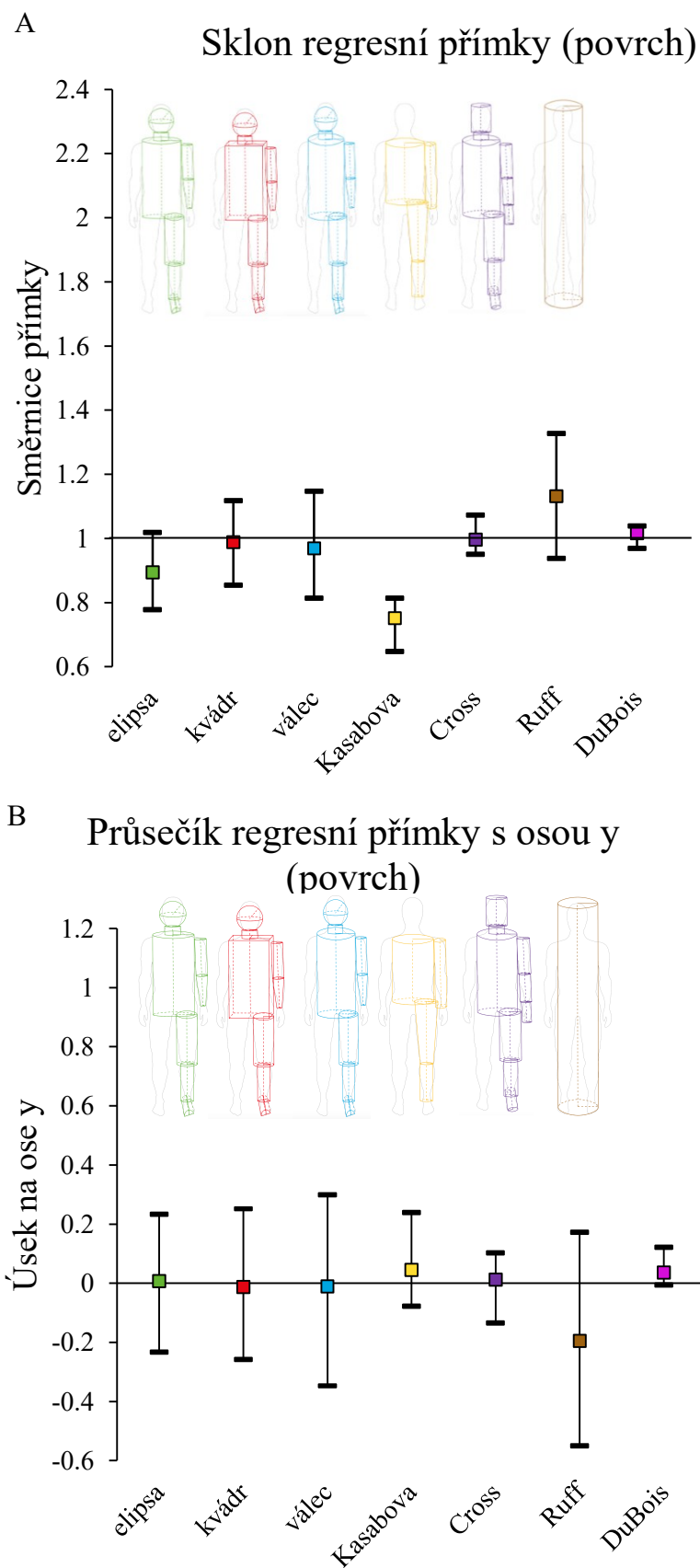
Graf 2. Průměrná procentuální odchylka odhadu povrchu jednotlivými modely s konfidenčním intervalem s hladinou spolehlivosti 5 %.



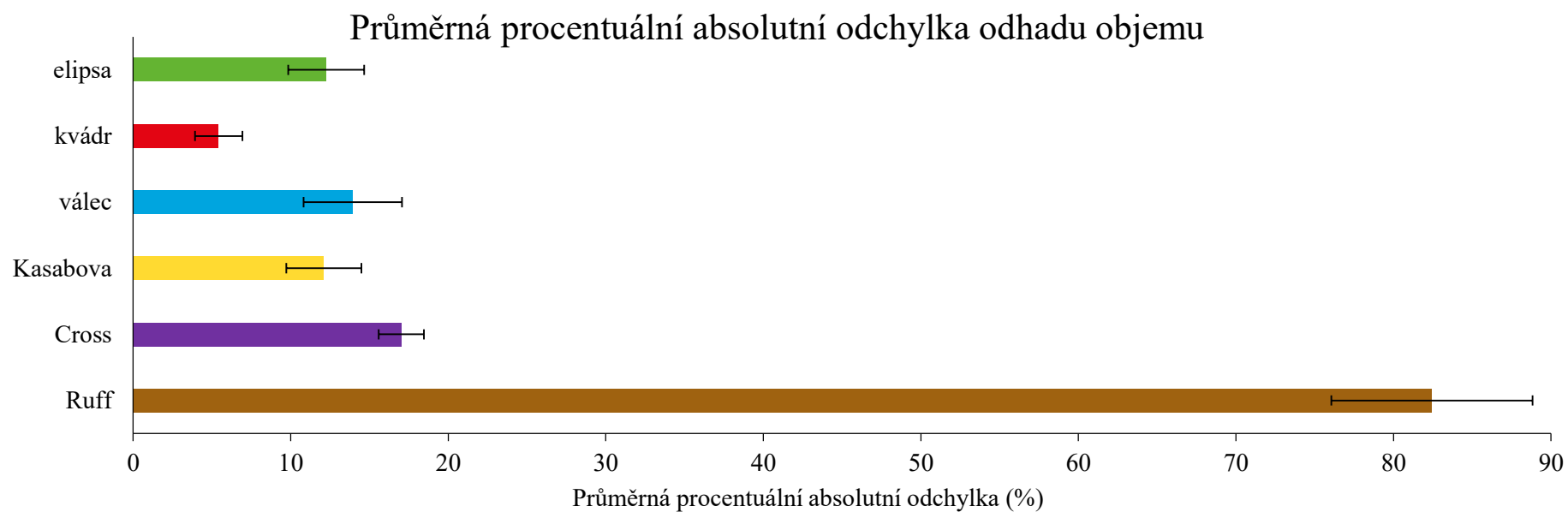
Graf 3. Srovnání měřeného a odhadovaného povrchu těla pomocí modelu elipsa (A), kvádr (B), válec (C), DuBois (D), Ruff (E), Cross (F) a Kasabova (G). Koeficient determinace a rovnice regresní přímky daná RMA regresní analýzou jsou zobrazeny.



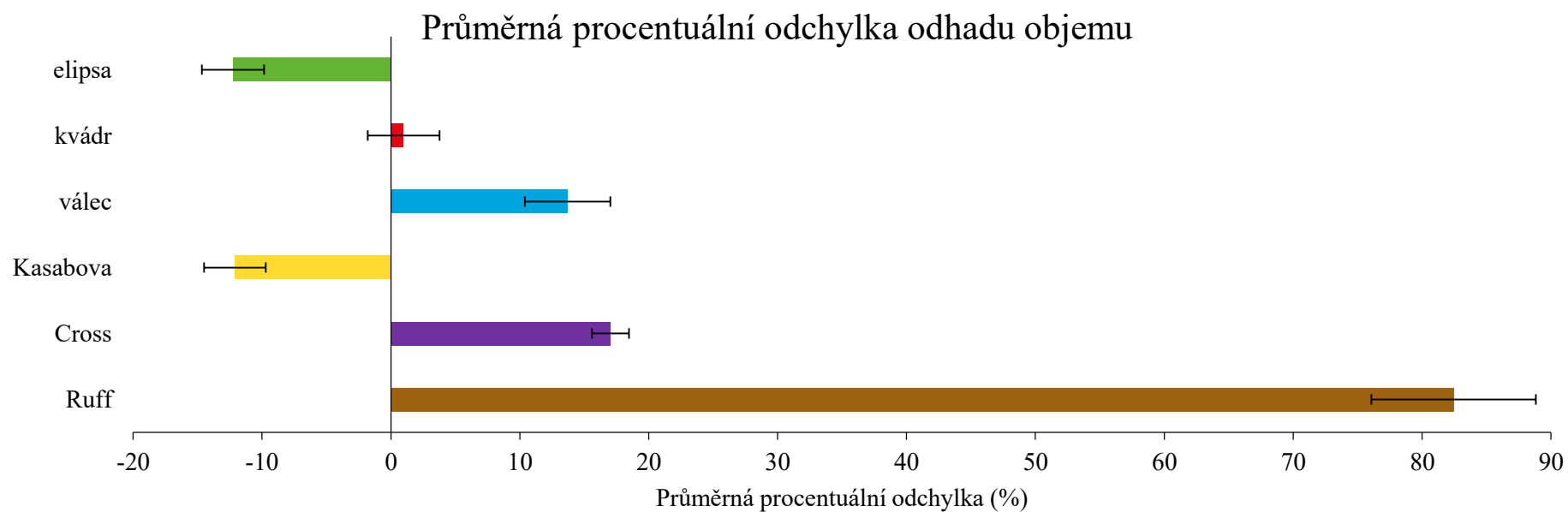
Graf 4. Srovnání měřeného povrchu těla a odhadovaných povrchů těla pomocí jednotlivých modelů.



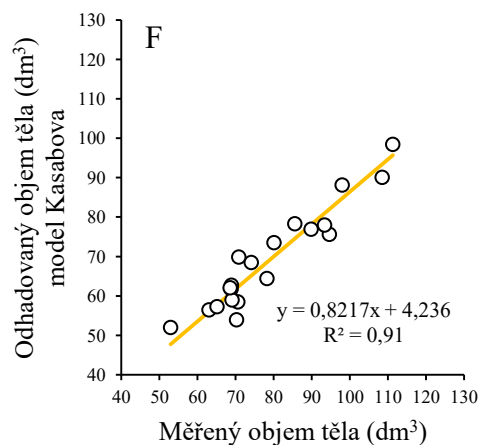
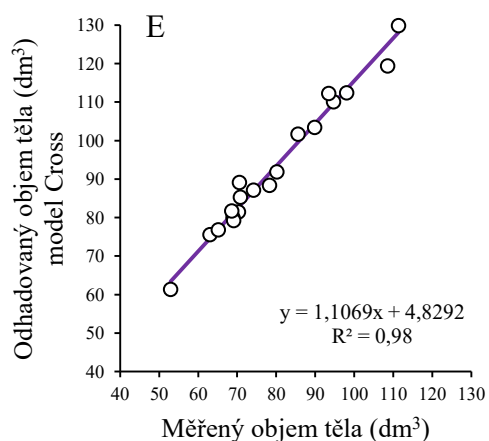
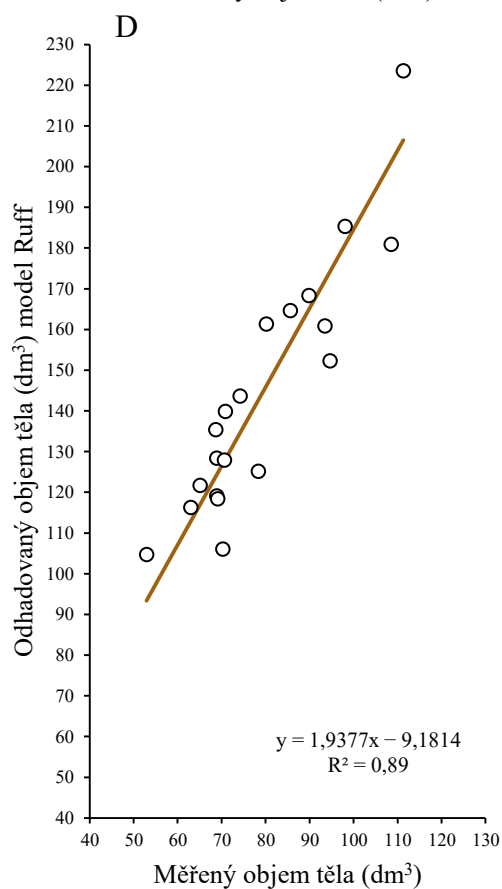
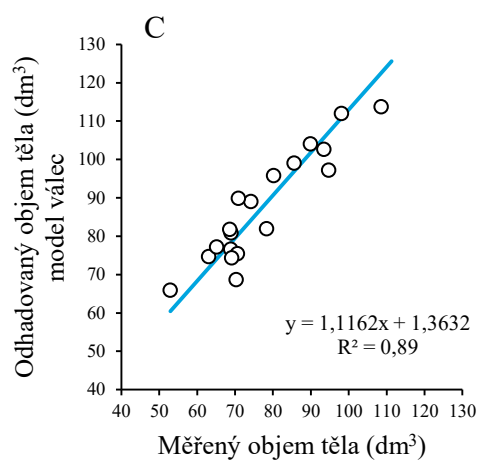
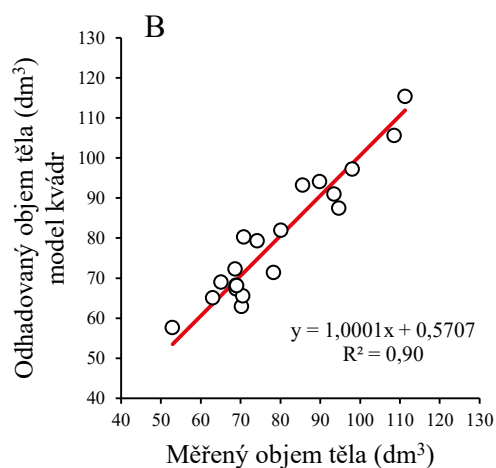
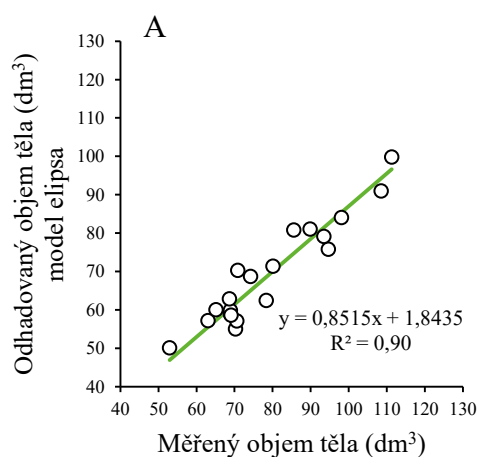
Graf 5. Sklon regresní přímky dán směrnici přímky pro jednotlivé modely odhadující povrch (A) a průsečík regresní přímky s osou y jednotlivých modelů pro odhad povrchu (B).



Graf 6. Průměrná procentuální absolutní odchylka odhadu objemu jednotlivými modely s konfidenčním intervalem s hladinou spolehlivosti 5 %.

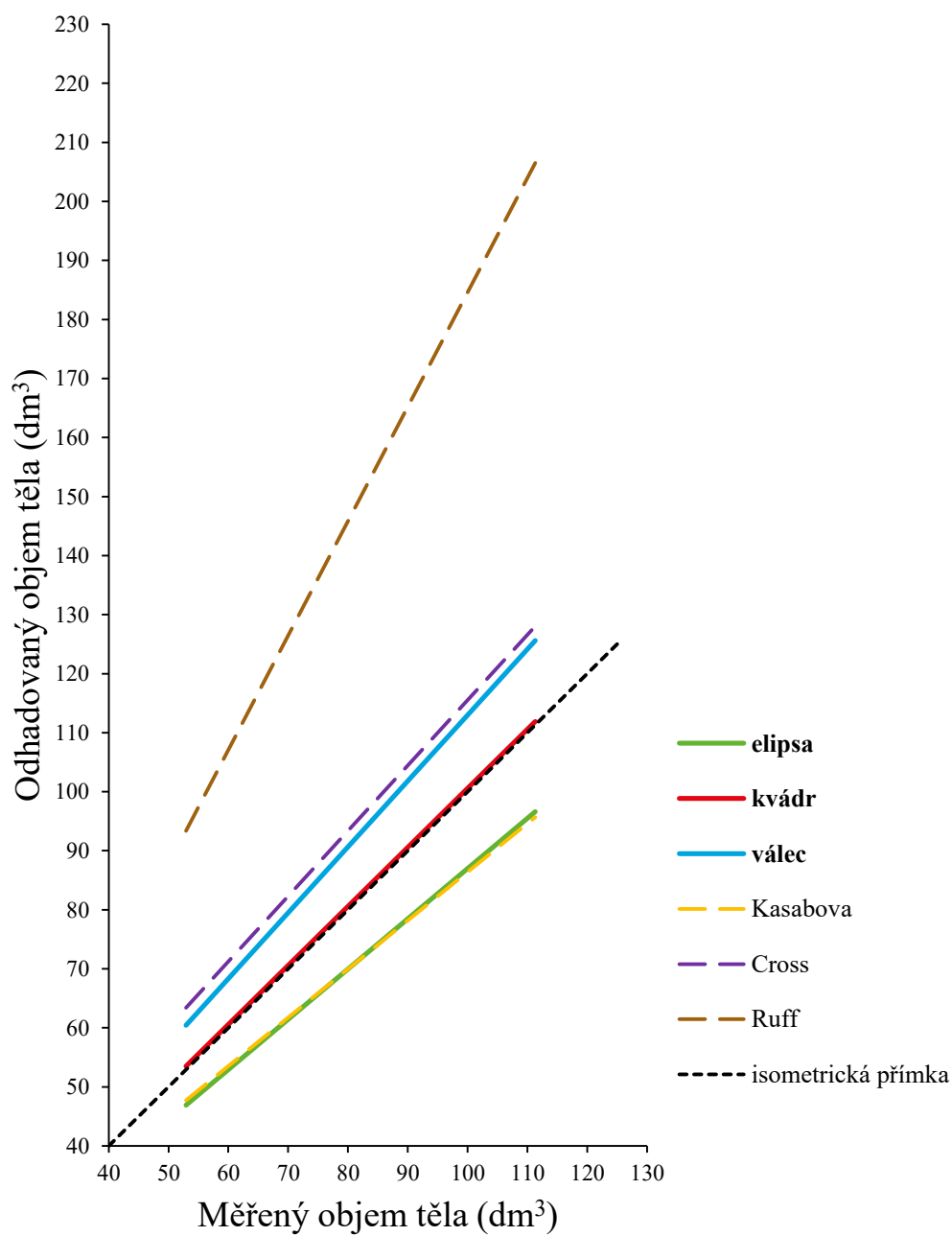


Graf 7. Průměrná procentuální odchylka odhadu objemu jednotlivými modely s konfidenčním intervalem s hladinou spolehlivosti 5 %.

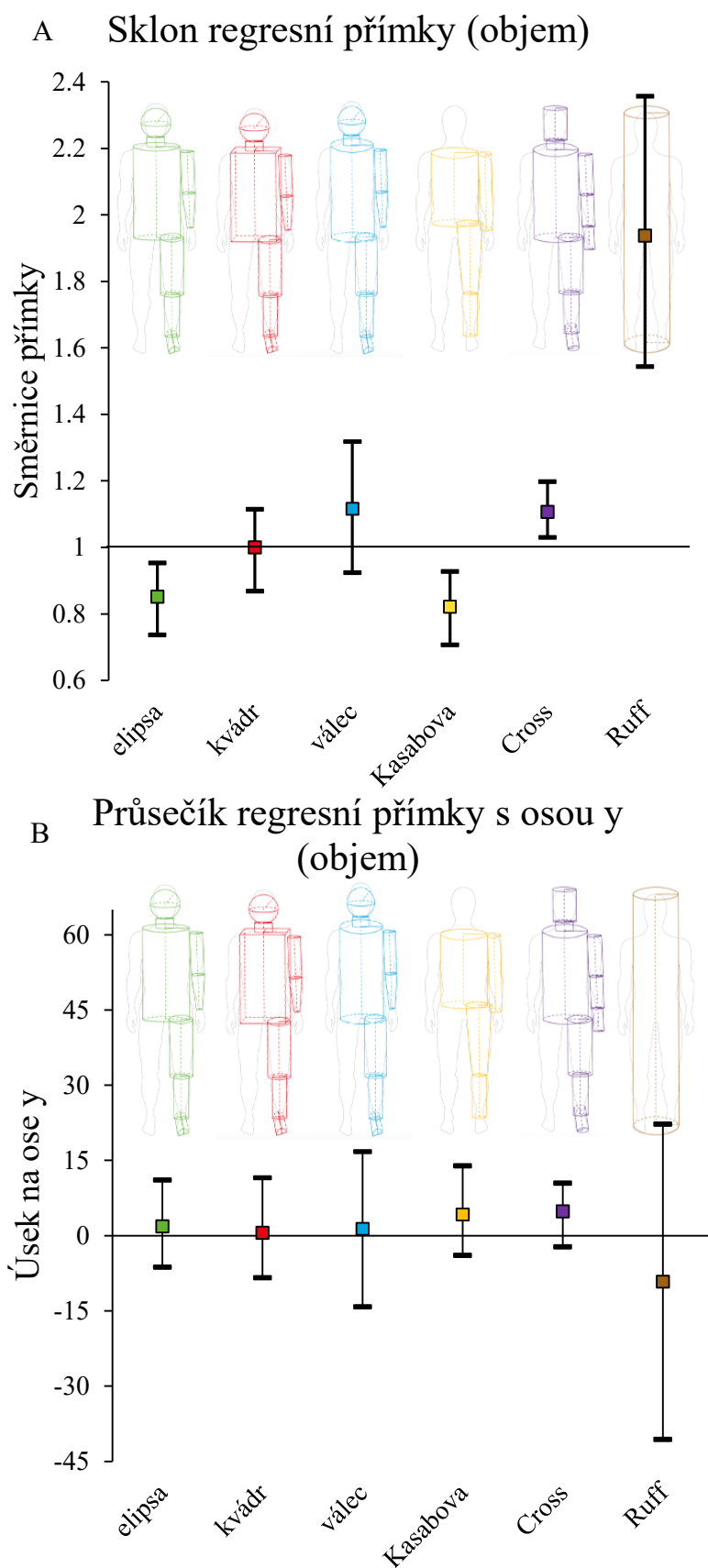


Graf 8. Srovnání měřeného a odhadovaného objemu těla pomocí modelu elipsa (A), kvádr (B), válec (C), Ruff (D), Cross (E) a Kasabova (F). Koeficient determinace a rovnice regresní přímky daná RMA regresní analýzou jsou zobrazeny.

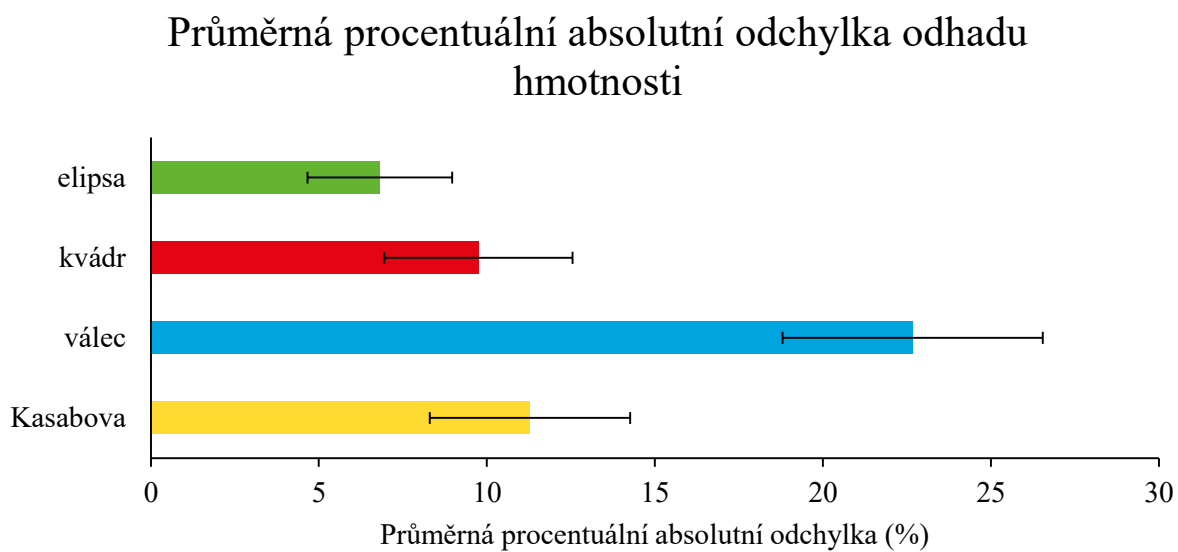
Srovnání odhadu objemu těla



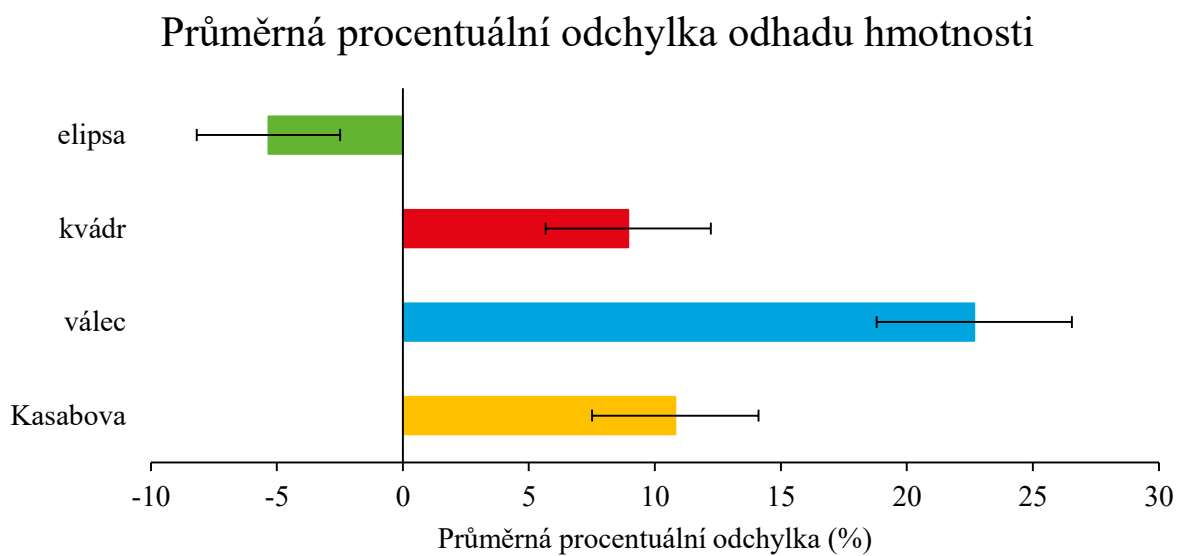
Graf 9. Srovnání měřeného objemu těla a odhadovaných objemů těla pomocí jednotlivých modelů.



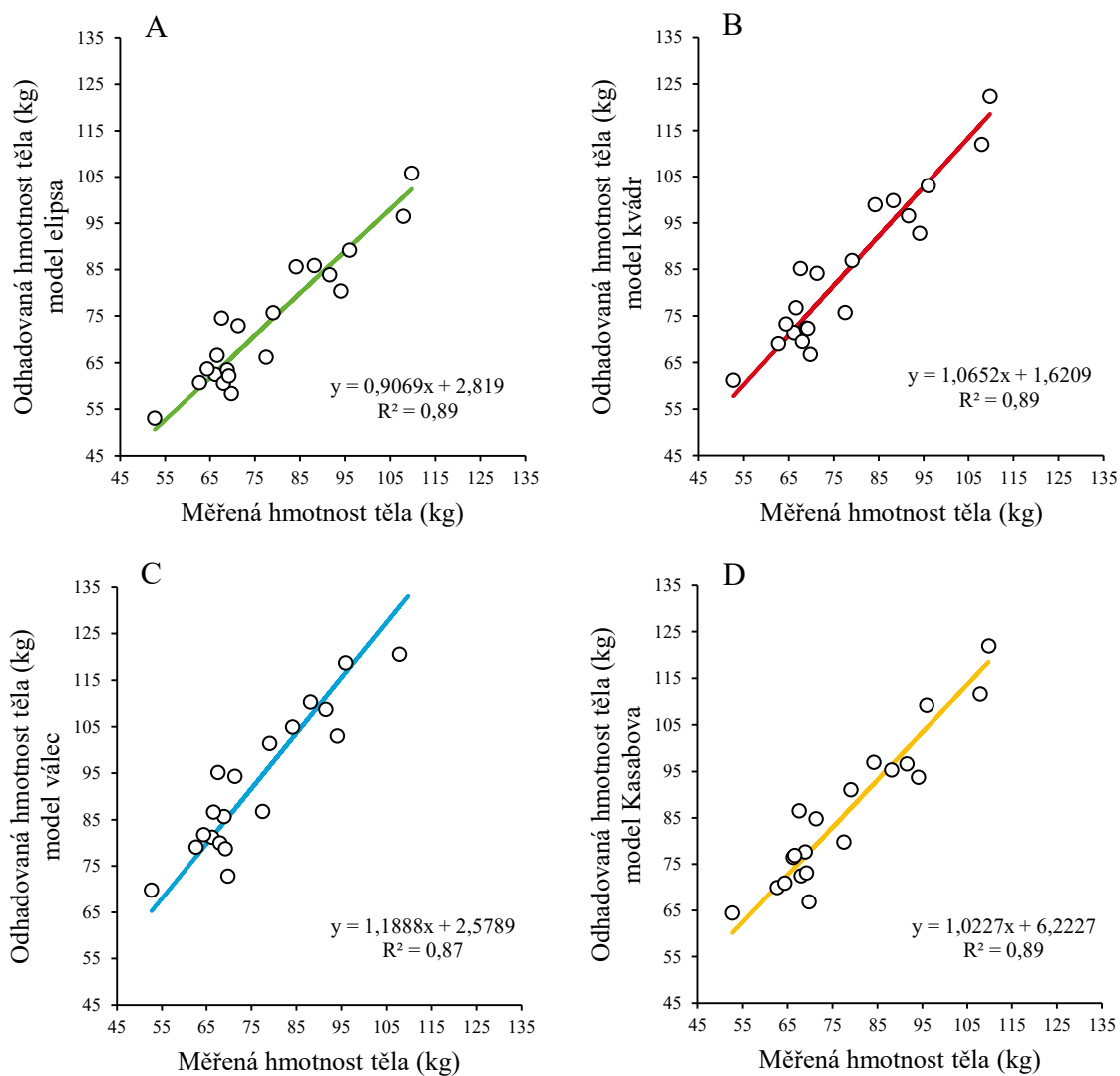
Graf 10. Sklon regresní přímky dán směrnici přímky pro jednotlivé modely odhadující objem (A) a průsečík regresní přímky s osou y jednotlivých modelů pro odhad objemu (B).



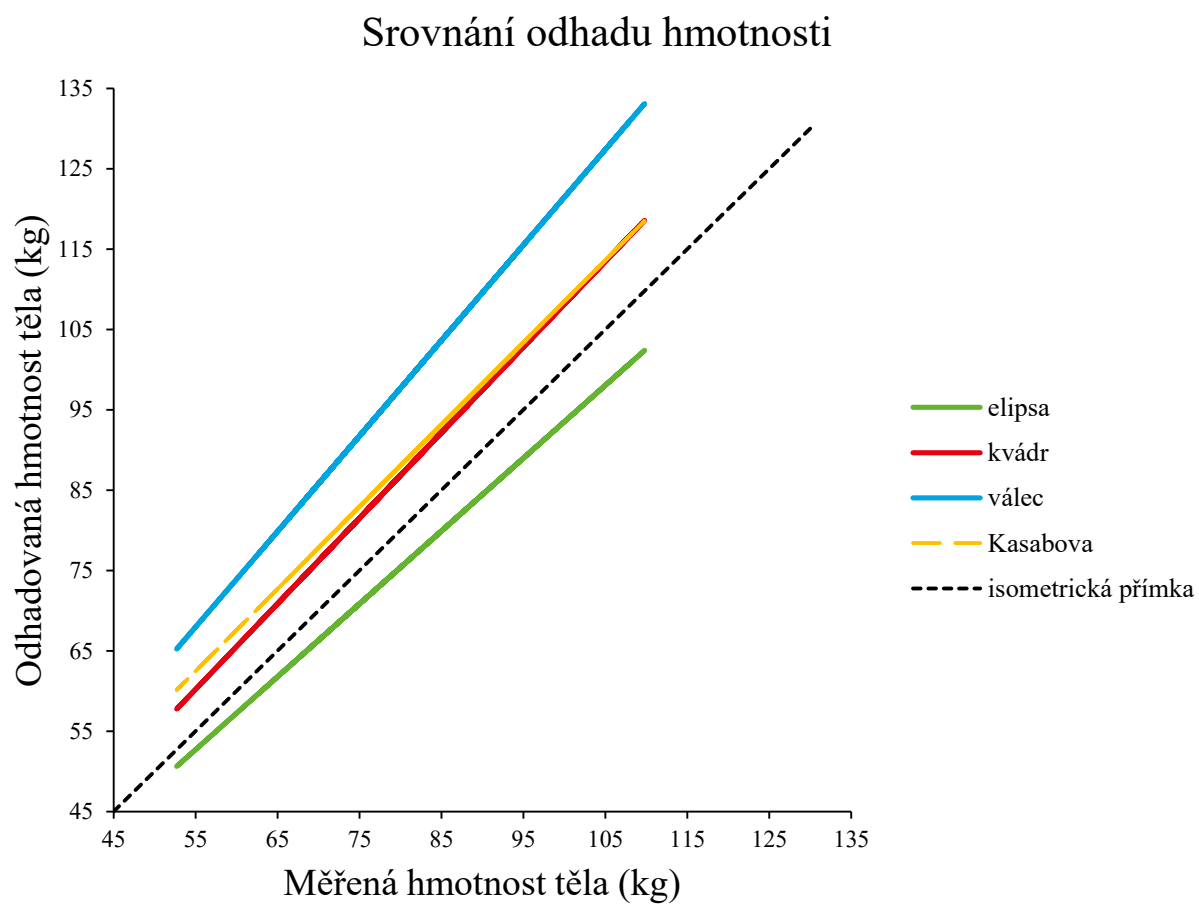
Graf 11. Průměrná procentuální absolutní odchylka odhadu hmotnosti jednotlivými modely s konfidenčním intervalem s hladinou spolehlivosti 5 %



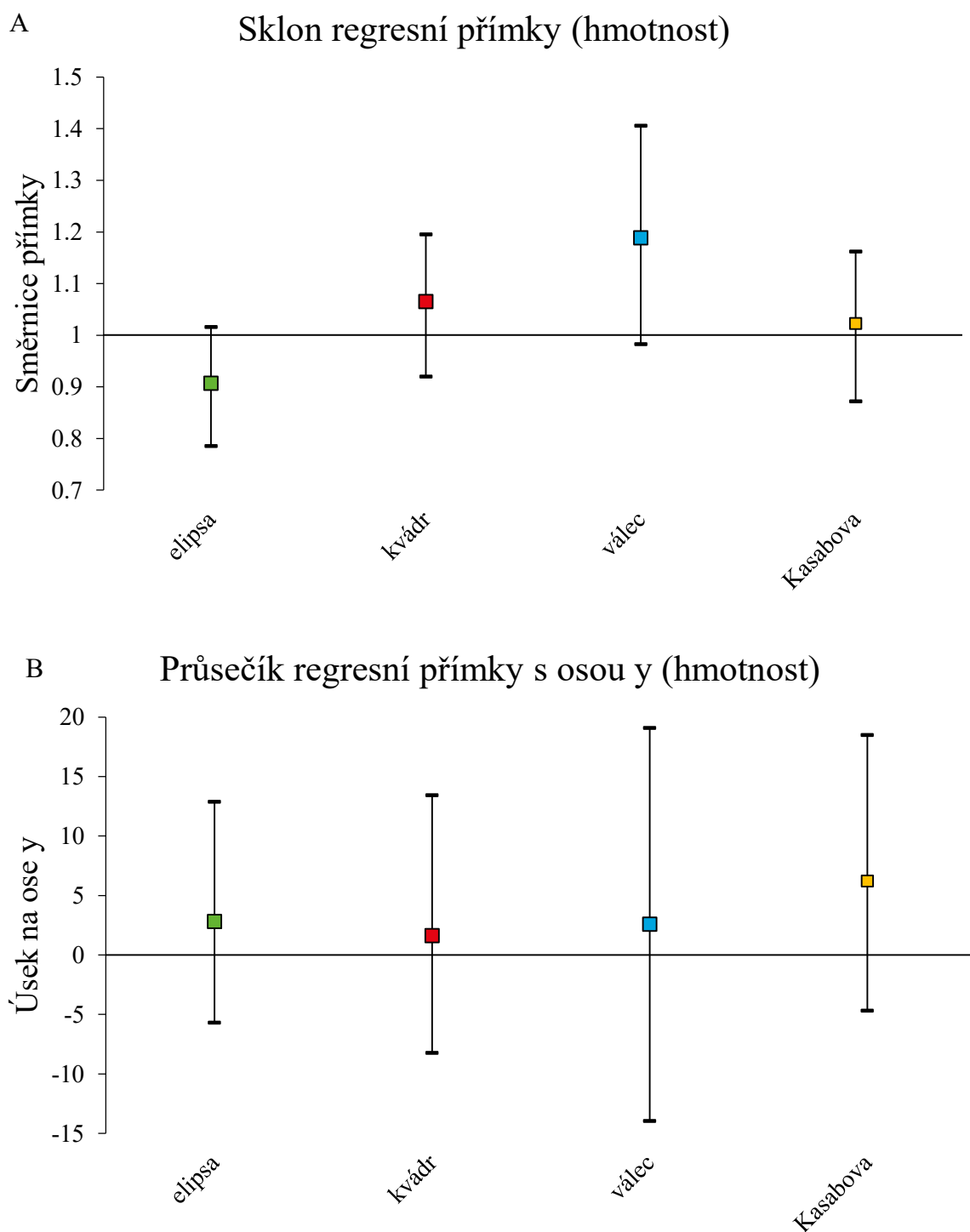
Graf 12. Průměrná procentuální odchylka odhadu hmotnosti jednotlivými modely s konfidenčním intervalem s hladinou spolehlivosti 5 %



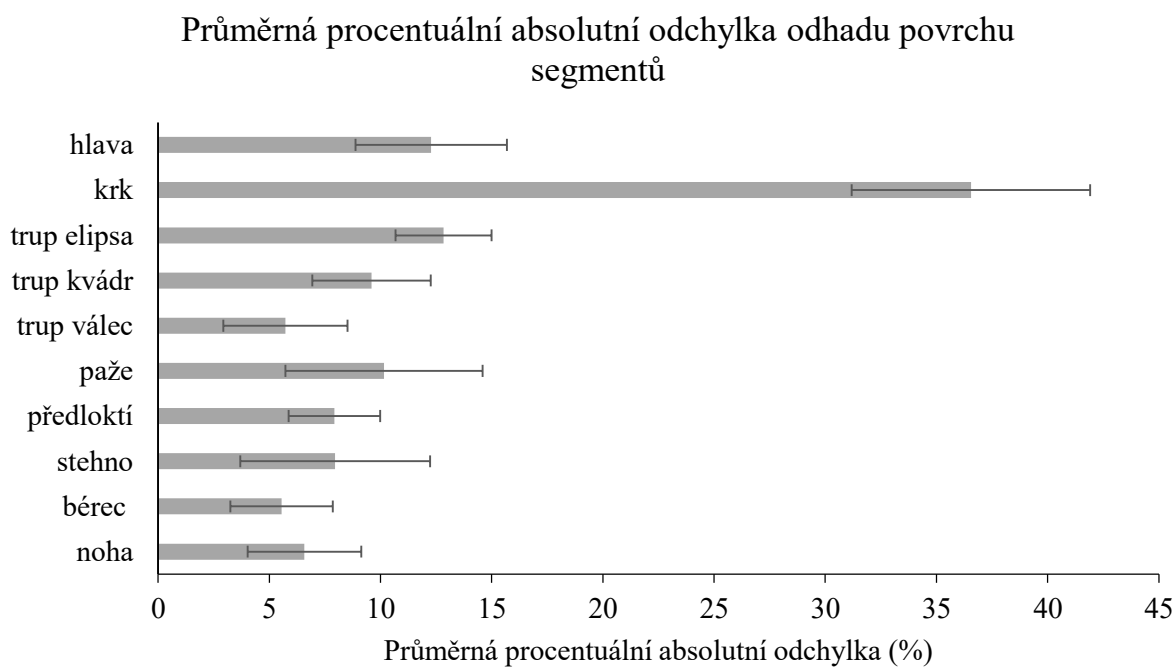
Graf 13. Srovnání měřené a odhadované hmotnosti těla pomocí modelu elipsa (A), kvádr (B), válec (C) a Kasabova (D). Koeficient determinace a rovnice regresní přímky daná RMA regresní analýzou jsou zobrazeny.



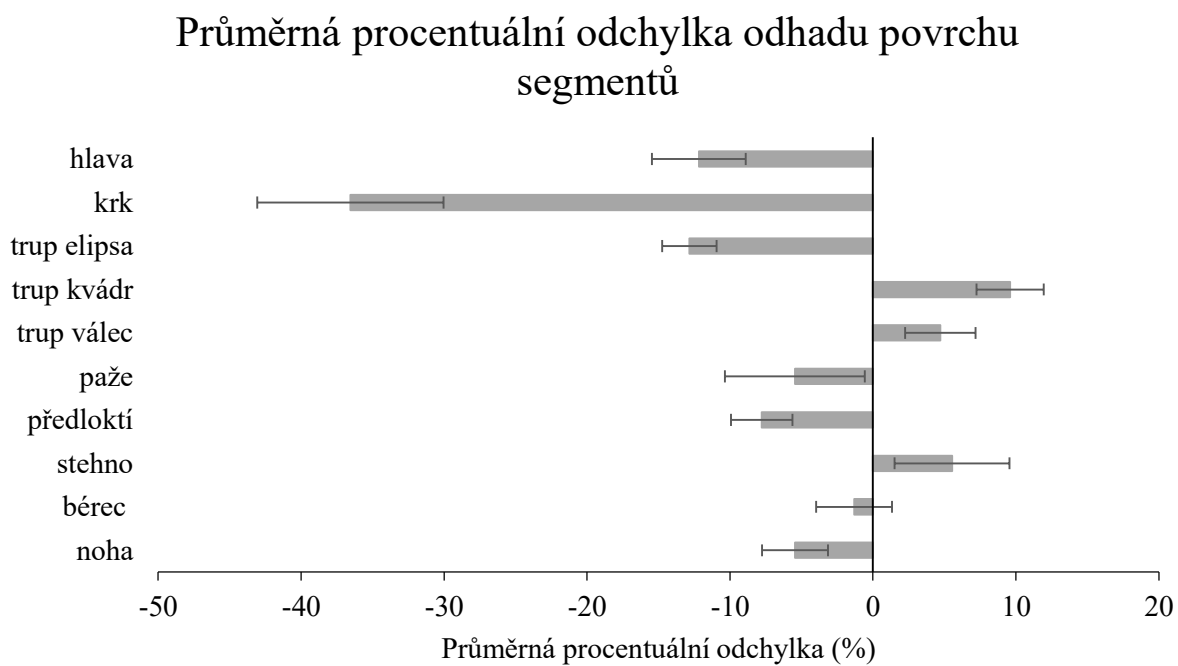
Graf 14. Srovnání měřené hmotnosti těla a odhadovaných hmotností těla pomocí jednotlivých modelů.



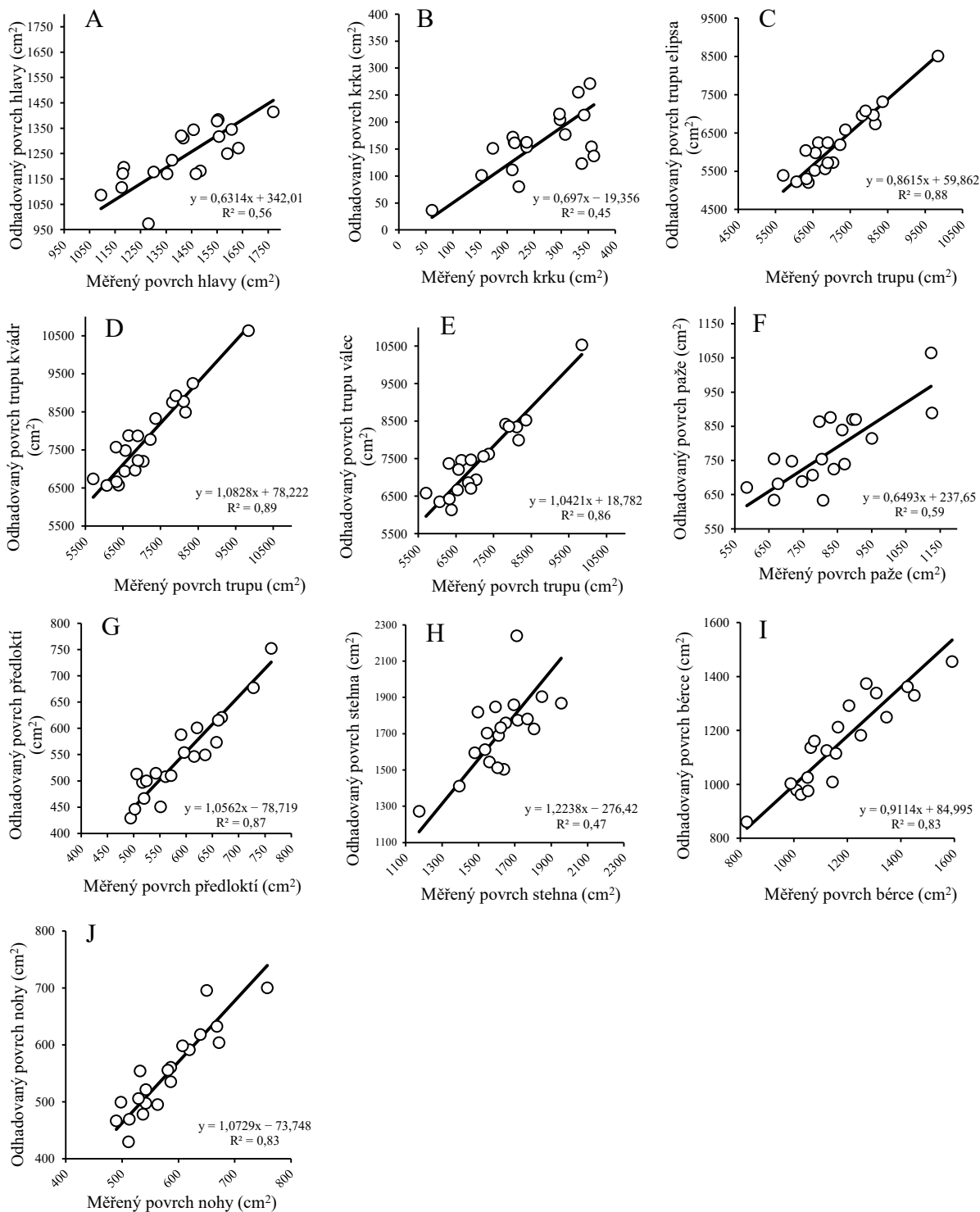
Graf 15. Sklon regresní přímky dán směrnici přímky pro jednotlivé modely odhadující hmotnost (A) a průsečík regresní přímky s osou y jednotlivých modelů pro odhad hmotnosti (B).



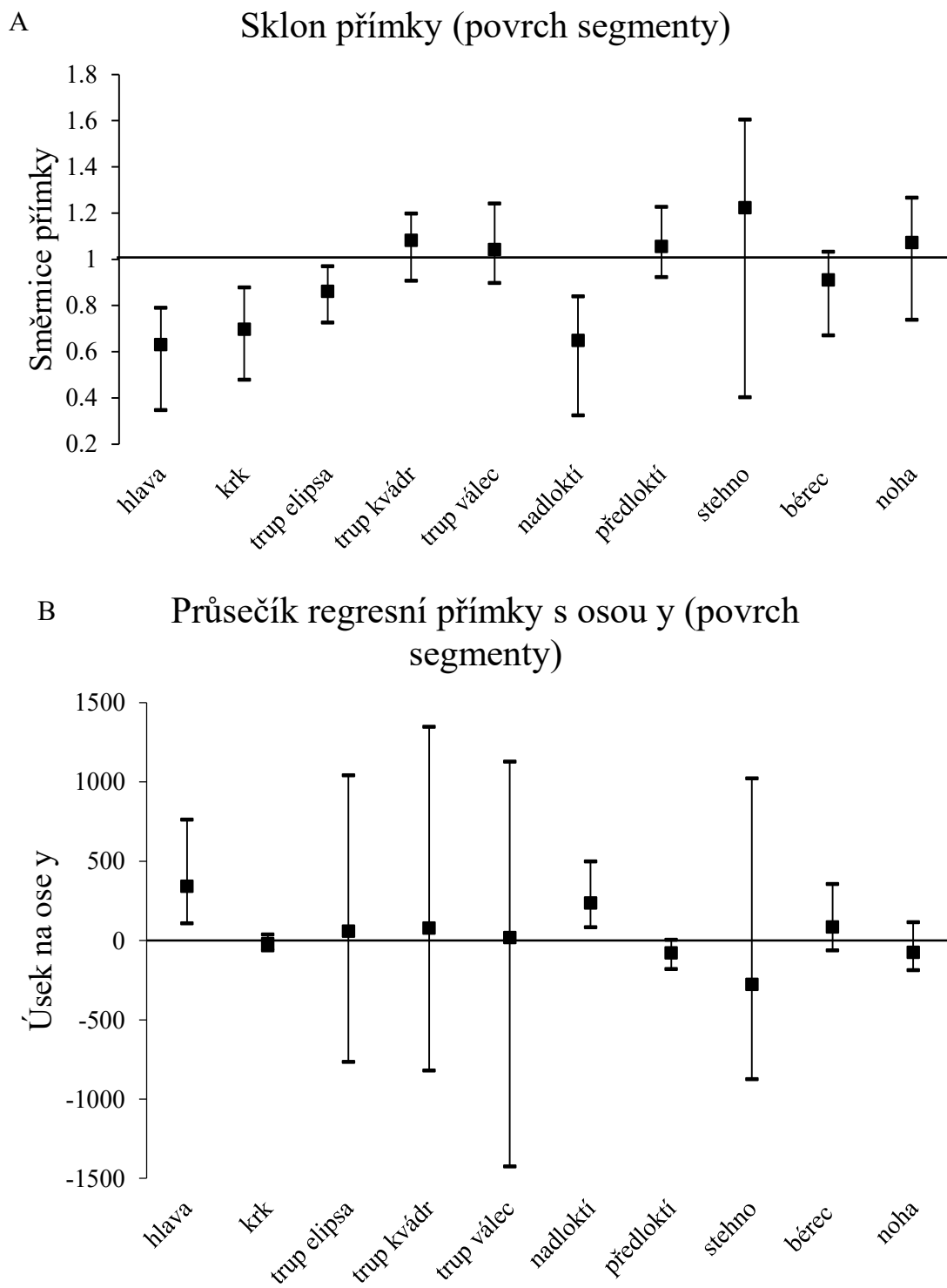
Graf 16. Průměrná procentuální absolutní odchylka odhadu povrchu jednotlivých segmentů s konfidenčním intervalem s hladinou spolehlivosti 5 %.



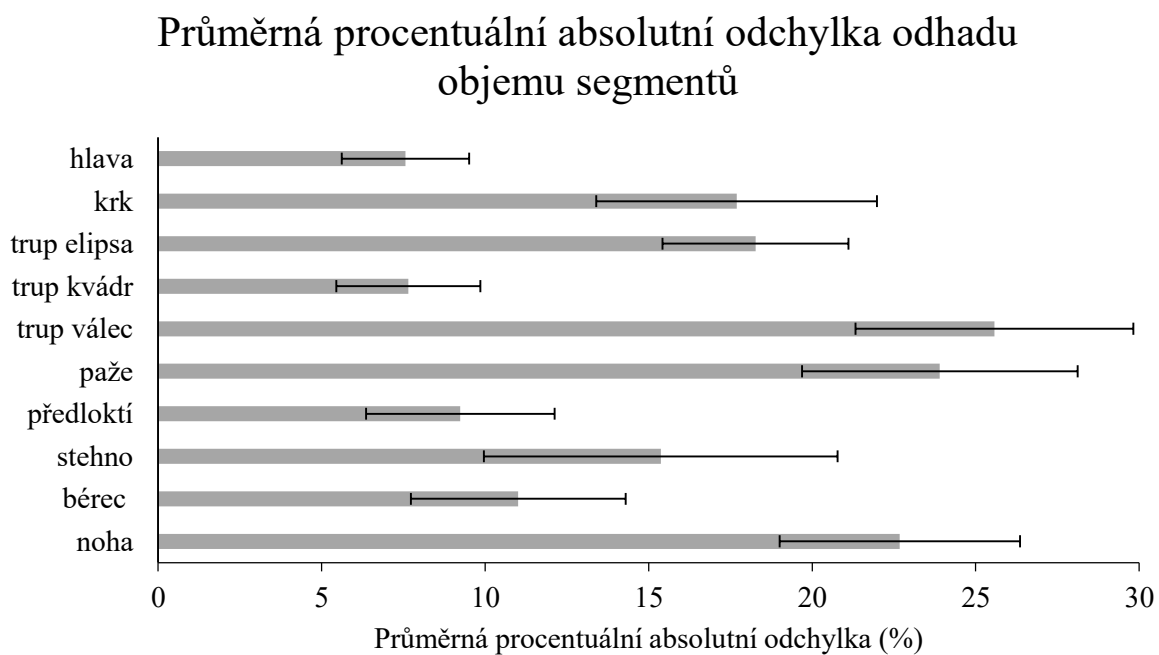
Graf 17. Průměrná procentuální odchylka odhadu povrchu jednotlivých segmentů s konfidenčním intervalem s hladinou spolehlivosti 5 %.



Graf 18. Srovnání měřeného a odhadovaného povrchu jednotlivých segmentů našeho modelu. Srovnání měřeného a odhadovaného povrchu hlavy (A), krku (B), trupu elipsa (C), trupu kvádr (D), trupu válec (E), paže (F), předloktí (G), stehna (H), bérce (I) a nohy (J). Koefficient determinace a rovnice regresní přímky daná RMA regresní analýzou jsou zobrazeny.

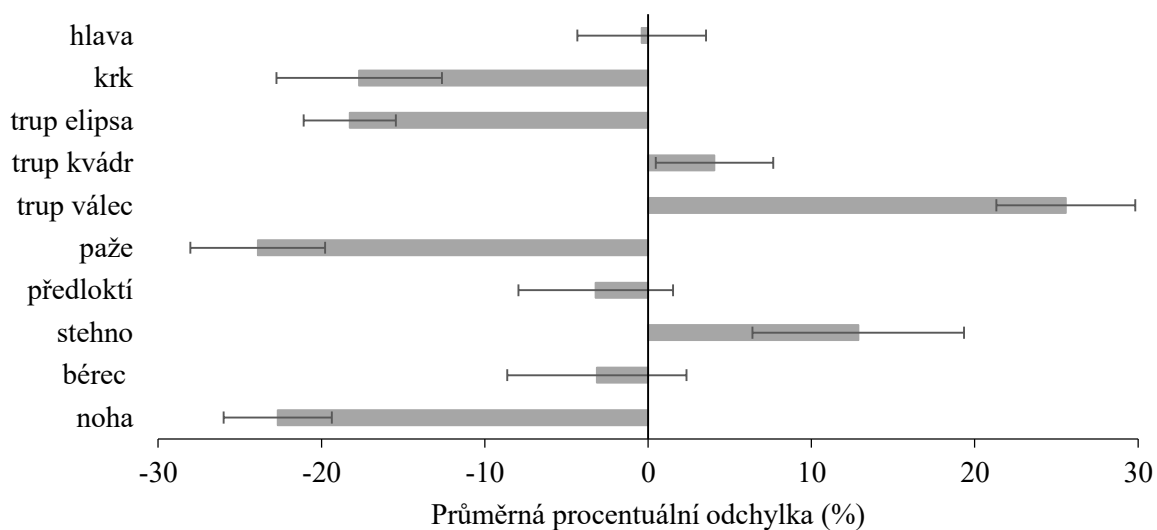


Graf 19. Sklon regresní přímky dán směrnici přímky pro jednotlivé odhadované povrchy segmentů našeho modelu (A) a průsečík regresní přímky s osou y jednotlivých odhadovaných povrchů segmentů našeho modelu (B).

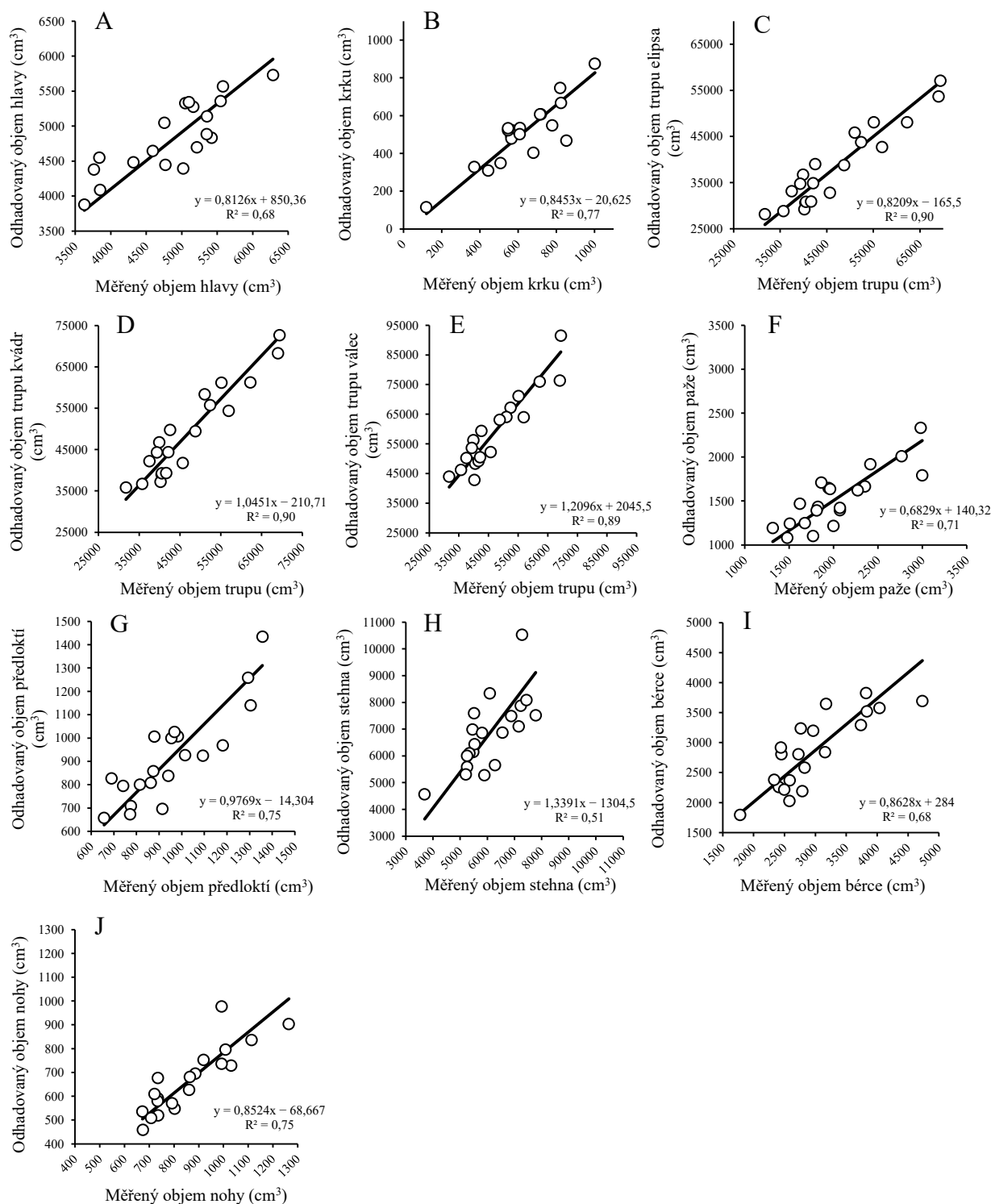


Graf 20. Průměrná procentuální absolutní odchylka odhadu objemu jednotlivých segmentů s konfidenčním intervalem s hladinou spolehlivosti 5 %.

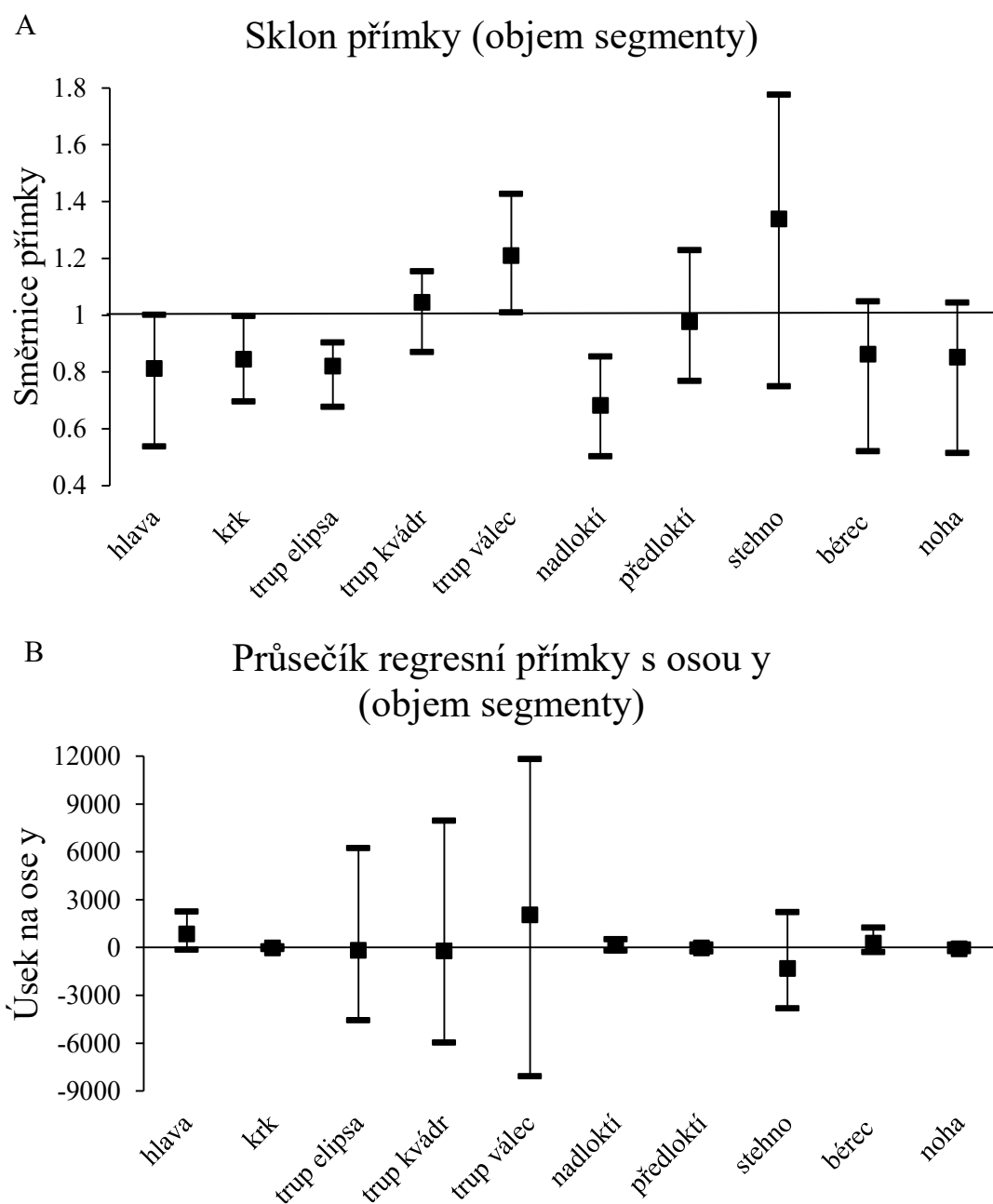
Průměrná procentuální odchylka odhadu objemu segmentů



Graf 21. Průměrná procentuální odchylka odhadu objemu jednotlivých segmentů s konfidenčním intervalem s hladinou spolehlivosti 5 %.

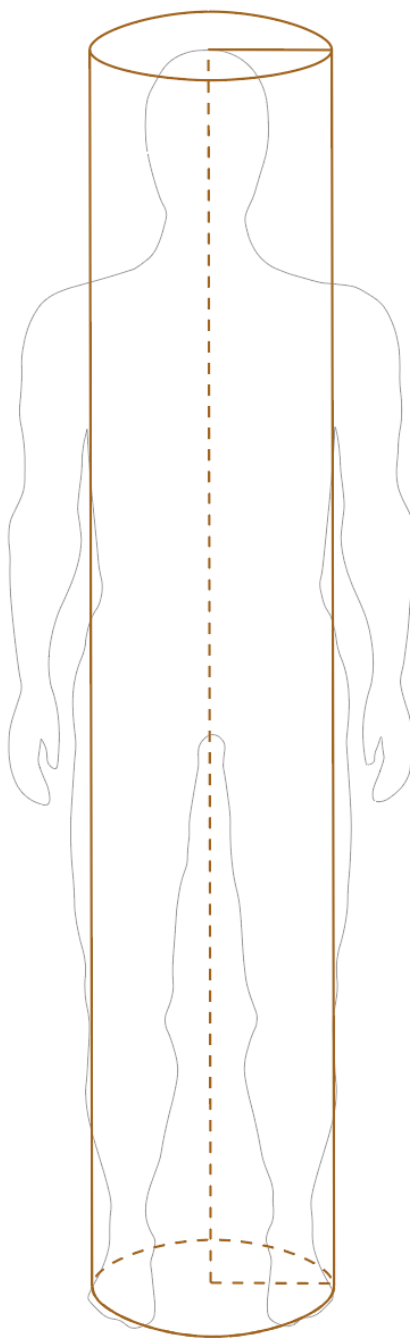


Graf 22. Srovnání měřeného a odhadovaného objemu jednotlivých segmentů našeho modelu. Srovnání měřeného a odhadovaného objemu hlavy (A), krku (B), trupu elipsa (C), trupu kvádř (D), trupu válec (E), paže (F), předloktí (G), stehna (H), bérce (I) a nohy (J). Koeficient determinace a rovnice regresní přímky daná RMA regresní analýzou jsou zobrazeny.

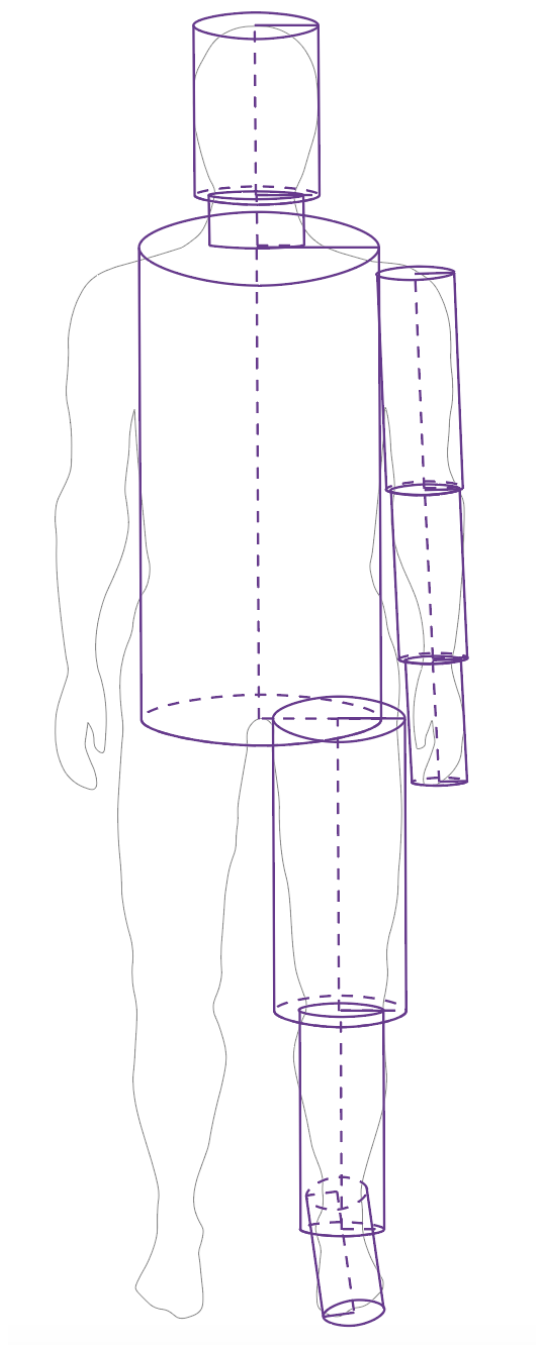


Graf 23. Sklon regresní přímky dán směrnici přímky pro jednotlivé odhadované objemy segmentů našeho modelu (A) a průsečík regresní přímky s osou y jednotlivých odhadovaných objemů segmentů našeho modelu (B).

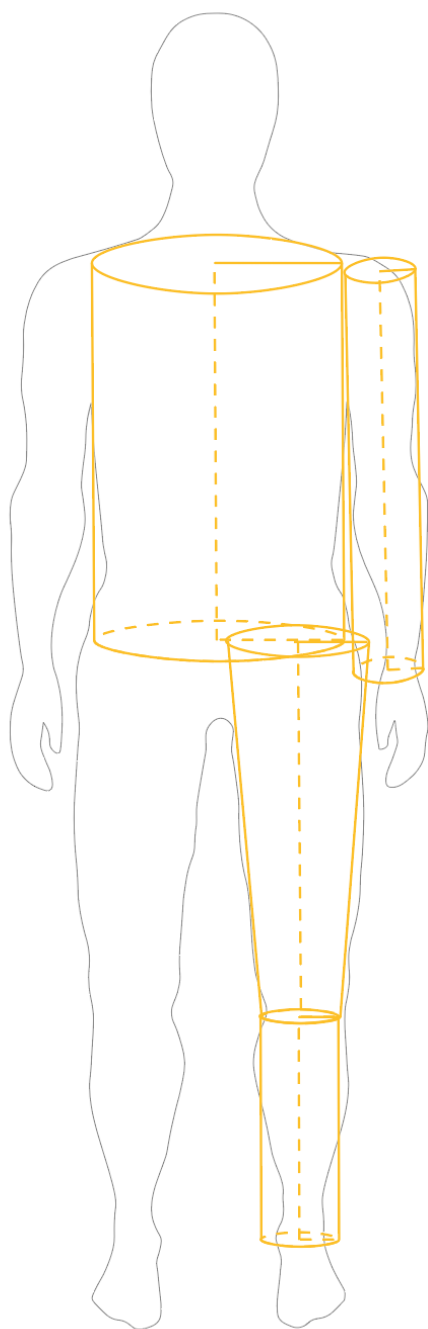
8.3 Obrázky



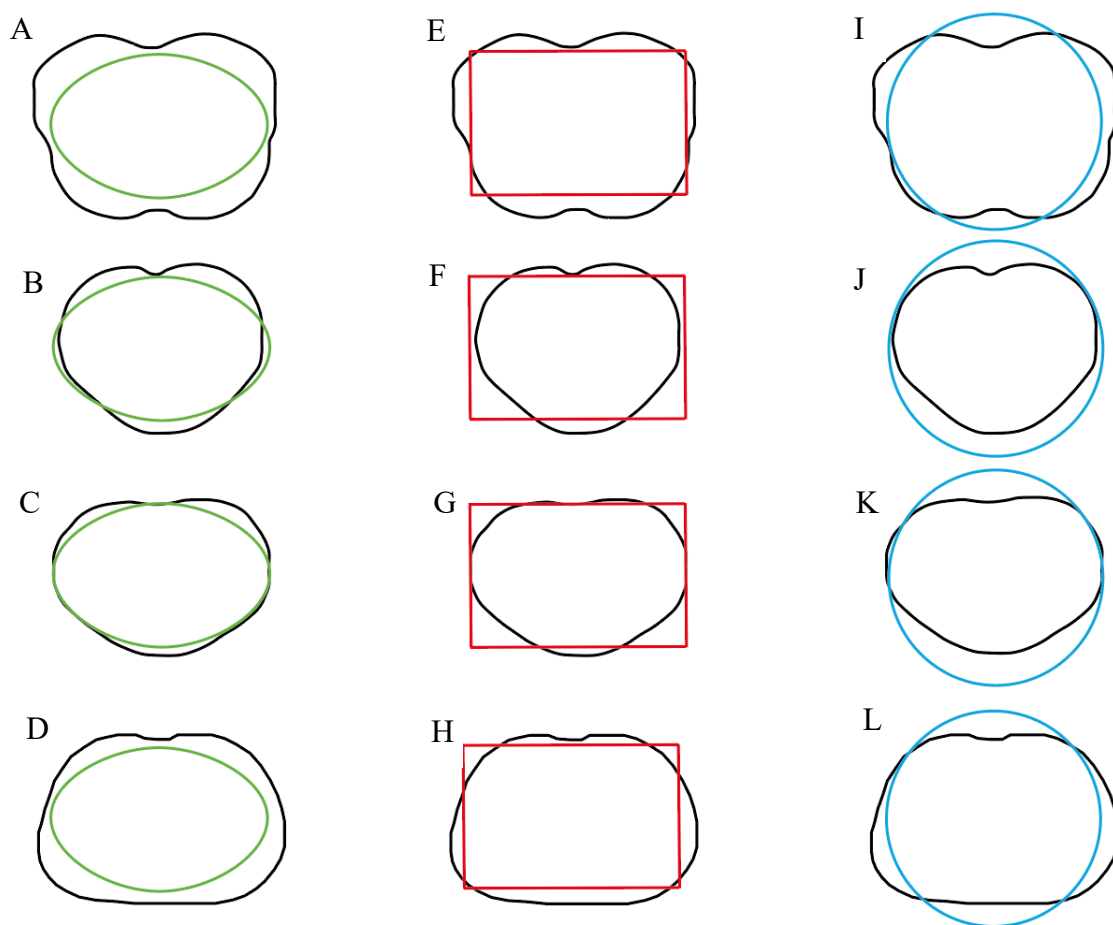
Obrázek 1. Znázornění modelu Ruff. Upraveno dle Ruff (1991).



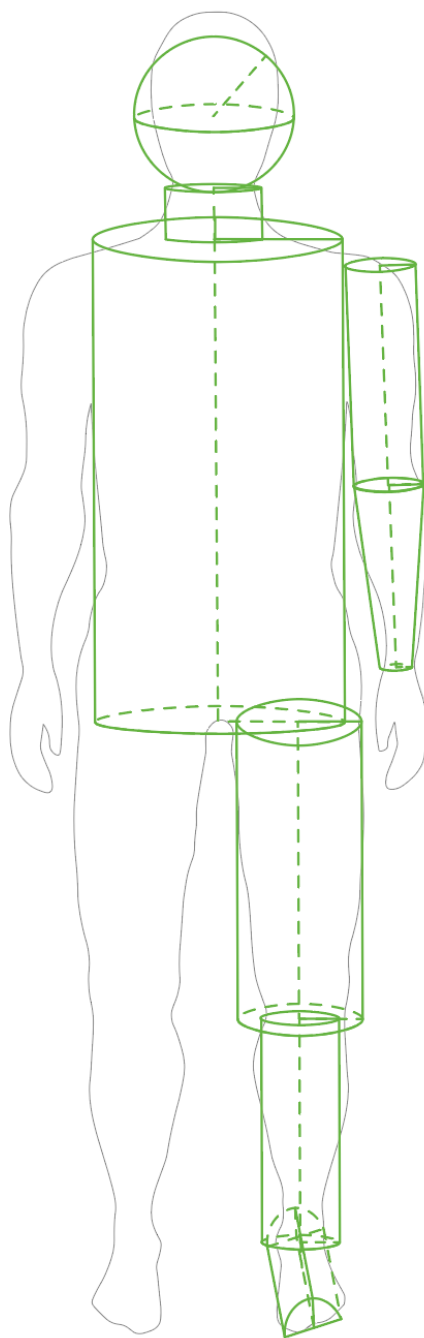
Obrázek 2. Znázornění modelu Cross. Upraveno dle Cross a kolektiv (2008).



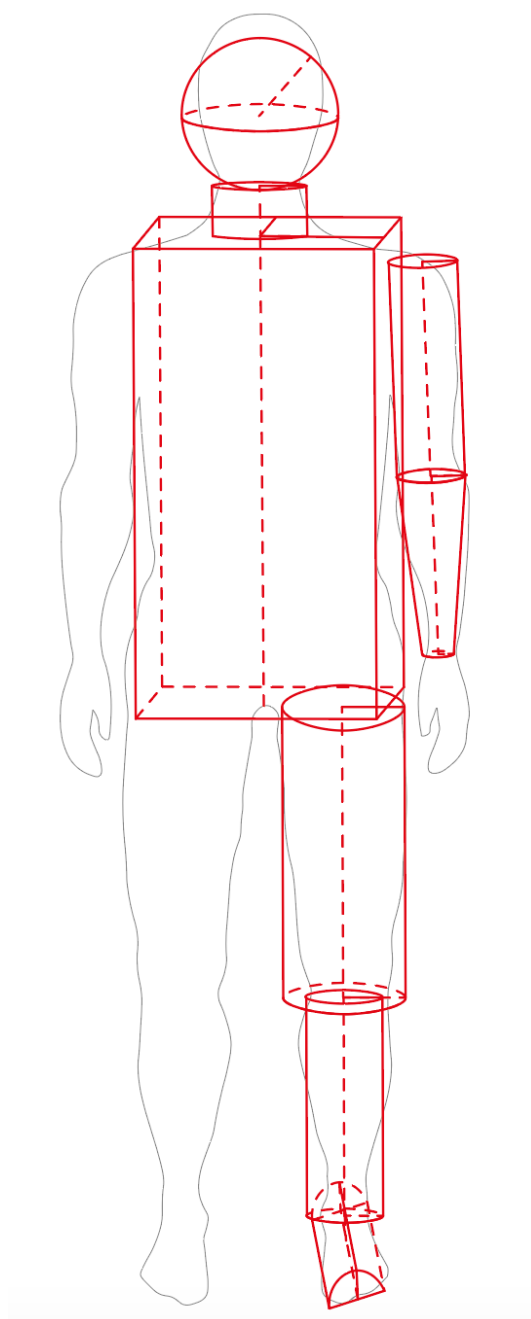
Obrázek 3. Znázornění modelu Kasabova. Upraveno dle Kasabova a Holliday (2015).



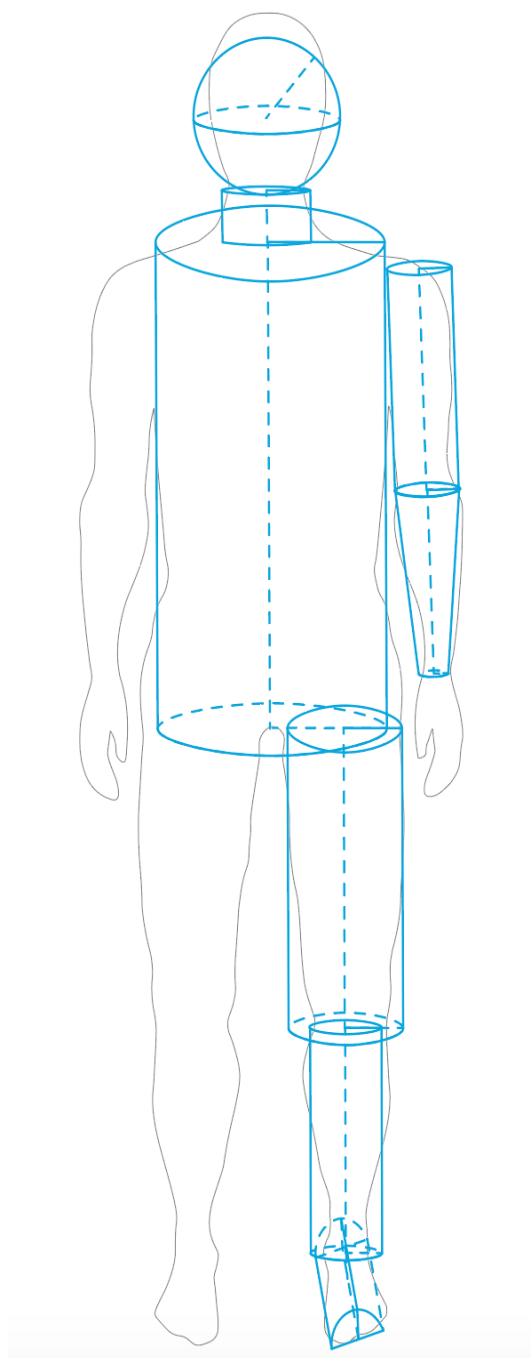
Obrázek 4. Průřezy trupu A, B, C a D jsou proloženy obrysem modelu elipsa zeleně, E, F, G, a H jsou proloženy obrysem modelu kvádr červeně a průřezy trupu I, J, K a L jsou proloženy obrysem modelu válec modře. Průřezy trupu A, E a I jsou na úrovni obvodu hrudníku v normální poloze (M 61). Průřezy trupu B, F a J jsou na úrovni obvodu pasu (M 62). Průřezy trupu C, G a K jsou na úrovni bodu iliocristale a průřezy trupu D, H a L jsou na úrovni obvodu boků (M 64(1)).



Obrázek 5. Znázornění modelu elipsa.



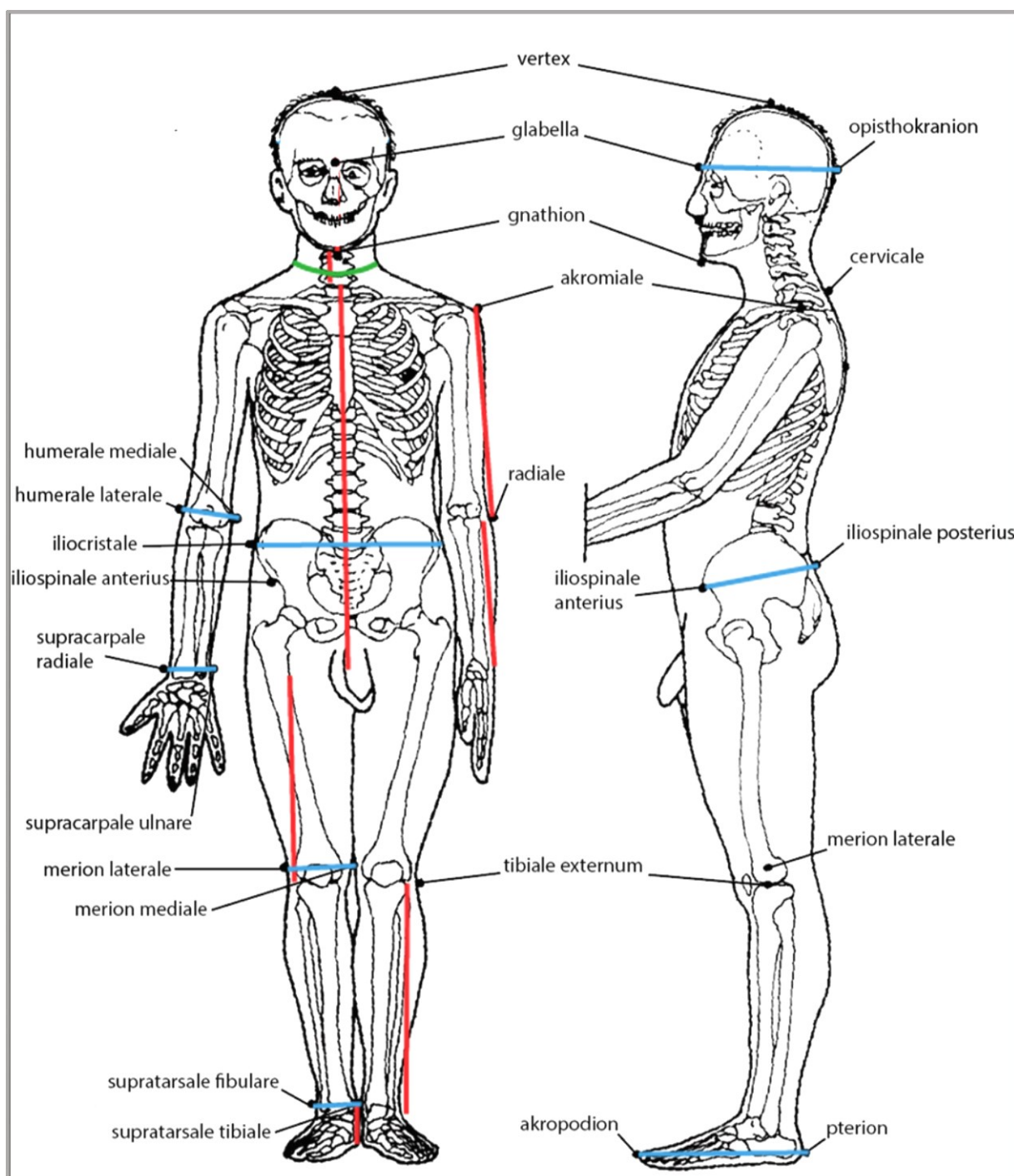
Obrázek 6. Znázornění modelu kvádr.



Obrázek 7. Znázornění modelu válec.



Obrázek 8. Ukázka 3D celotělového skenu. Skeny pořídili Kordsmeyer, Stern a Penke (2019).



Obrázek 9. Zobrazení použitých antropometrických bodů a rozměrů pro varianty našeho multisegmentového modelu lidského těla. Červeně jsou vyobrazeny výškové rozměry, modře šířkové rozměry a zeleně obvodový rozměr. Upraveno dle Knussmann (1988).